

# Forest ecosystem services: economic evaluation of carbon sequestration on a large scale

Federica Russo\*, Gabriella Maselli\*\*, Antonio Nesticò\*\*\*

*Keywords:* forest ecosystem services, payments for ecosystem services, CO<sub>2</sub> sequestration, economic valuation

## Abstract

*The role of ecosystem services is a central issue in current debates concerning the environment, the climate emergency and the sustainable development strategies. Natural capital, an invaluable source of wellbeing for humankind, is suffering from continuous and unsustainable human exploitation. This leads to a significant transformation of ecosystems and a consequent loss of biodiversity across the planet. In recent years, increased environmental awareness has generated much attention to the activation of a financial instrument aimed at the conservation and enhancement of ecosystems: the Payment for Ecosystem Services. Although the main objective is the preservation of our territory and its resources, PES schemes can also contribute to reducing inequalities, reducing poverty, and improving livelihoods, particularly when embedded in effective sustainable development strategies. A prerequisite for the application of this instrument is the economic valuation of ecosystems and the services they provide, as the objects of transaction between its beneficiaries and providers. In doing so, this paper characterises a*

*methodology for the mapping and economic valuation of one of the main ecosystem services: CO<sub>2</sub> sequestration by forests. The latter, thanks to its capacity to absorb and store CO<sub>2</sub> in the atmosphere, plays a relevant role in combating climate change. The proposed methodology consists of four steps and includes: (i) the collection and processing of data concerning the forest categories of the area under analysis; (ii) the estimation of the annual removal and storage of organic carbon and (iii) its conversion into CO<sub>2</sub>, by forest category and hectare of soil; (iv) the estimation of the monetary value of the annually absorbed CO<sub>2</sub> stock. The methodology is applied to the territory of the Campania Region and can be replicated in different contexts and at different scales. The perspective of the study is the development of a software that allows, through the perimeter of an area on a map, the automatic measurement of the quantity of CO<sub>2</sub> annually absorbed by the forest stock and the monetary value of the corresponding ecosystem service.*

## 1. INTRODUCTION AND AIM STUDY

The climate emergency that the world is facing and the increase in greenhouse gas emissions have stimulated a

growing interest in forests and its crucial role in addressing climate change. Indeed, forests, thanks to their ability to absorb and store CO<sub>2</sub> in the atmosphere, provide a significant contribution to the great climate

challenge of our times: on a global scale, they annually sequester about 4 PgC, equivalent to almost 50% of the CO<sub>2</sub> annually emitted by fossil fuel use (Magnani and Raddi, 2021).

Carbon dioxide sequestration is just one of the many invaluable ecological, as well as economic, social and health benefits of forestry. This is to be translated into great attention to an ecosystem that is indispensable for the ecological transition and the conversion of our economy into a circular one.

However, deforestation continues at an alarming rate, on a local and global scale. According to the State of the World's Forests (FAO and UNEP, 2020), deforestation is one of the main causes of global warming, accounting for 12 to 20 per cent of greenhouse gas emissions.

The failure to recognise the important role played by forests has long caused and continues to cause unsustainable human exploitation of natural resources. The result is a significant transformation of the ecosystem and irreversible loss of biodiversity across the planet.

In the light of the above, in recent years an increased awareness of environmental issues has brought ecosystems and related services to the centre of numerous debates: in particular, great attention has been paid to the activation of instruments aimed at their conservation and valorisation.

Among these instruments, Payments for Ecosystem Services (PES) have assumed a central role. They bring ecosystem services into a market context by making the beneficiaries of an environmental service pay the service provider to ensure its continuation or improvement (Muradian et al., 2010).

The application of PES requires economic valuation to help strengthen understanding and communication of the values of natural capital and ecosystem services.

In this sense, the paper aims to outline a methodological framework to economically evaluate one of the main forest ecosystem services, namely annual carbon dioxide sequestration, at a large scale. The proposed methodology is divided into four phases and provides for: the collection and processing of data regarding the forest categories of the area under analysis; the estimation of the annual removal and storage of organic carbon, by forest category and hectare of soil; the conversion into CO<sub>2</sub> of the stock of organic carbon annually removed and stored; the estimation of the monetary value of CO<sub>2</sub> absorbed annually, by forest category and hectare of soil.

The use of the Charter for Nature and forest categories provides a greater level of detail than similar studies that usually use the Land Use Map and forest macro-categories. Furthermore, the proposed metrics are developed with a view to automation, through the characterisation of software for the mapping process and economic evaluation of CO<sub>2</sub> sequestration by the forest heritage.

The proposed methodology is applied to the Campania Region, whose forest heritage covers 370,000 hectares. The analyses return a value of 2,172,800 tonnes of CO<sub>2</sub> absorbed annually, for an economic consideration of 178,172,560 euro with reference to the regulated market.

The paper is structured as follows. Section 2 describes the carbon dioxide sequestration function, as the main ecosystem service provided by forests. Section 3 analyses the main methodologies adopted in the literature to estimate the economic value of carbon dioxide. Section 4 reports the methodology that we propose for mapping and economically valuing the CO<sub>2</sub> sequestration function of the forest heritage over a wide area. Section 5 shows the application of the methodology with reference to the forest heritage of the Campania Region. Finally, the paper concludes with a discussion of the results and the resulting considerations.

## 2. CARBON DIOXIDE SEQUESTRATION FUNCTION

Covering about one third of the Earth's surface, today's forests represent one of the largest and most biologically diverse ecosystems on the planet. In fact, it contains 80% of the world's biodiversity. This conserved biodiversity is a source of essential services and benefits that the forest heritage provides to the environment and people.

In technical terms, these are ecosystem services, such as "ecosystem goods (such as food) and services (such as waste assimilation) represent the benefits human populations derive, directly or indirectly, from ecosystem functions" (Costanza et al., 1997).

In detail, among the first classifications of ecosystem services, the function of carbon dioxide sequestration falls into one of the four categories that the Millennium Ecosystem Assessment (MEA, 2005) defines as 'regulating': services that promote the health and good functioning of ecosystems, with direct and indirect benefits on human health as well.

Equally, the function of carbon dioxide sequestration is included within the regulatory services of the classification of The Economics of Ecosystems and Biodiversity project (TEEB, 2010) and the more recent and international Common International Classification of Ecosystem Services (CICES, 2018), which includes, for instance, atmospheric gas regulation services, prevention of hydrogeological disruption, pollination regulation, etc. (Gaglioppa et al., 2017; Haines-Young and Potschin, 2018).

Forest ecosystems are also able to store assimilated carbon for relatively long periods of time. Moreover, the use of wood products makes it possible to 'lock in' considerable amounts of carbon throughout the entire life cycle of works. In fact, forests, through the process

of chlorophyll photosynthesis, capture solar energy by converting the carbon dioxide absorbed from the atmosphere into nutrients, releasing oxygen as waste.

According to the Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry (IPCC, 2003), to account for the carbon absorbed by the forest ecosystem, five types of carbon sinks are identified:

- epigeal biomass, i.e. the total mass of living plant species present above ground level and consisting of stems, stumps, branches, bark, seeds and leaves;
- hypogeal biomass consisting of the root systems;
- woody necromass consisting of the tissues of organisms no longer living, still standing or landed, or parts of the same organisms (portions of trunks and branches resting on the ground, stumps);
- litter consisting of plant residues at different stages of decomposition covering the organic and mineral layers of the soil;
- soil including organic and mineral horizons up to a predetermined depth of 30 cm.

These carbon pools are strongly influenced by climate, age structure (Clark et al., 2004), forest type (Somogyi et al., 2007; Zhang et al., 2013), as well as land use, logging, and other natural and human-induced disturbances (Canadell et al., 2007).

The National Inventory of Forests and Forest Carbon Sinks (INFC) makes available the results of the operational surveys carried out between 2008 and 2009: these are currently the most up-to-date data as estimates from the latest report will be available once the ground surveys are completed.

These results define the amount of organic carbon accumulated in Italian forests and the amount of organic carbon absorbed and emitted annually by trees as a result of forest growth and wood and timber removal, respectively. The values are estimated for the Italian regions and divided according to the categories defined by the inventory: high forests, woody arboriculture plantations and areas temporarily devoid of stands (Di Cosmo et al., 2011; Gasparini et al., 2013; Tabacchi and Di Cosmo, 2011).

Inventory data show, at the reference year, a total amount of organic carbon of 1.24 billion tonnes, or 141.7 t/ha, corresponding to 4.5 billion tonnes of carbon dioxide absorbed from the atmosphere. Most of the organic carbon in Italian forests is accumulated in soils, which contain 57.6% of the total, or 715.7 Mt. This is followed by epigeal tree biomass, which contains 472.7 Mt of carbon, 54.0 t/ha, or 38.1% of the total. Finally, 24.9 and 28.3 Mt of organic carbon are accumulated in the litter and necromass, respectively, representing 2.0% and 2.3% of the total carbon. In addition, as a result of tree growth, 12.6 Mt of carbon are fixed annually, corresponding to an absorption of carbon dioxide from the atmosphere of 46.2 Mt, or about 5 t/ha of CO<sub>2</sub> equivalent (Cesaro et al., 2019).

### 3. CO<sub>2</sub> MONETARY VALUE

Attributing an economic value to environmental resources is a possible tool for safeguarding biodiversity and ecosystem services, as well as a starting point for addressing the current environmental crisis.

However, many environmental goods and services, such as those of regulation, are intangible and do not have a reference market and, consequently, an exchange price. Indeed, the mistake long made is to assume that some ecosystem services lack value simply because they are not immediately quantifiable in money (Barde and Pearce, 1993; Costanza et al., 2014).

Valuing an environmental good in economic terms is, therefore, a complex process in which both tangible and intangible aspects are considered.

To attribute a monetary value to the ecosystem service of CO<sub>2</sub> sequestration in the atmosphere, it is possible to proceed through the application of different methodologies and models from which estimates with often very heterogeneous values are derived. An examination of the sector literature reveals the following estimation approaches: (i) Social Cost of Carbon (SCC); (ii) Shadow Price of Carbon (SPC); (iii) market price.

The SCC approach (i) consists of estimating the social value of the ecosystem service in question, which can be quantified based on the social damage avoided by not emitting or sequestering CO<sub>2</sub> in the atmosphere (Stern, 2007; Mavsar et al., 2014). It is, precisely, the discounted monetary value of future global damages caused by an additional unit of greenhouse gas released into the atmosphere each year (Pearce, 2003). Thus, the SCC measures the magnitude of the externality that needs to be incorporated into government policy decisions and investment options and indicates how much society would be willing to pay now to avoid future damage caused by incremental carbon emissions (Price et al., 2007). Since the amount of damage caused by each incremental unit of carbon in the atmosphere depends on the concentration of carbon in the atmosphere today and in the future, the SCC varies depending on the emission and concentration trajectory of the entire planet.

According to Price et al. (2007), a conceptual distinction must be made between SCC, carbon market price and Marginal Abatement Cost (MAC). In fact, the carbon market price reflects the value of carbon emission rights traded on the market (think, for instance, of the EU Emission Trade scheme); the MAC, on the other hand, represents the cost of emission reductions, rather than the damage imposed by new emissions.

According to scholars, the SCC approach poses two main theoretical difficulties: firstly, the emission trajectory and the consequent stabilisation trajectory on which the planet finds itself is a function of global emissions. Thus, estimating an SCC for one country

implies making assumptions about the actions of other countries; second, despite recent advances in modelling, there is considerable uncertainty about the SCC associated with a particular stabilisation target, and there is no guarantee that this value will allow for the abatement needed to achieve the target.

For both reasons, Price et al. (2007) suggest using the SPC approach (ii). This approach is based on the SPC but applies useful adjustments to reflect: the marginal abatement cost required to bring the planet to the stabilisation target; other factors that may influence a country's willingness to pay for carbon emission reductions. Thus, while the SCC depends exclusively on our understanding of the damage caused and how we assess it, the SPC can adapt to reflect the relevant political and technological context. This makes the SPC more versatile in ensuring that policy decisions are compatible with the government's climate change targets and commitments.

### 3.1 Social Cost of Carbon

To estimate the SCC, the United States Government Interagency Working Group on social cost of carbon relies on: the Dynamic Integrated Climate-Economy (DICE); Policy Analysis of the Greenhouse Effect (PAGE) (Hope, 2008); Climate Framework for Uncertainty, Negotiation, and Distribution (FUND) (Anthoff and Tol, 2013). Integrated Assessment Models (IAMs) have become essential for estimating the costs and benefits of policies to reduce greenhouse gas emissions. IAMs make it possible to predict the relationship between energy policy actions and climate change-induced damage (Moore et al., 2018).

The Dynamic Integrated Climate-Economy (DICE) model is usually preferred to other estimation models because of its versatility and the possibility of being integrated with other approaches. DICE maximises social utility by finding an optimal level of carbon abatement and, at that level, the Social Marginal Abatement Cost (SMAC), which is the direct output. Both SMAC and SCC are expressed in US dollars per tonne of CO<sub>2</sub> and represent the carbon cost associated with the abatement or emission of one tonne of CO<sub>2</sub>, respectively. Therefore, the SMAC is the direct result of the social welfare optimisation problem according to the DICE model. The SCC, on the other hand, is a combination of two indirect products of the model, i.e. it represents a 'trade-off rate' between additional emissions and additional consumption that can keep social utility constant (Khabarov et al., 2022).

Among IAMs, the PAGE model has been extensively investigated. PAGE09 - the latest iteration of PAGE - is an eight-region model that takes as inputs income, population, and emissions of four different greenhouse gases (carbon dioxide, methane, nitrous oxide and a set of other greenhouse gases). It uses a radiative

equilibrium climate model to simulate temperature changes and sea level rise at both global and regional scales (Moore et al., 2018).

FUND is a further IAM that employs projections of: populations; economic activities and emissions; carbon cycle and climate model responses; and welfare impacts of climate change (Link and Tol, 2011). These impacts mainly concern: agriculture, forestry, sea level rise, cardiovascular and respiratory disorders, diseases and epidemics, energy consumption, water resources, unmanaged ecosystems and impacts of tropical and extratropical storms (Anthoff and Tol, 2013).

Among the most recent studies, Rennert et al. (2022) estimate the SCC by implementing the Greenhouse Gas Impact Value Estimator (GIVE), an integrated assessment model that allows the quantification of the benefits of emission reduction. The model is built on an open-source platform (Mimi.jl). GIVE incorporates recent scientific advances that were not considered by the previous generation of IAMs. GIVE quantifies the uncertainties in each component and propagates these uncertainties, thus enabling an assessment that takes into account the risk associated with marginal CO<sub>2</sub> emissions. GIVE employs a series of probabilistic projections regarding population, economic growth per capita, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O<sub>3</sub> emissions.

In summary, estimating SCC via IAM requires: knowledge of the effect of emissions on future climate variables; estimation of the global damages that these climate variables will bring in the years to come; the choice of a rate to discount future damages to the present (Maselli and Nesticò, 2020; Nesticò and Maselli, 2020; Stern and Stiglitz, 2021; Tol, 2019).

### 3.2 Shadow Price of Carbon

A second methodology, widely used to assess the value of CO<sub>2</sub> in economic terms, is to estimate its shadow price. The latter can have markedly different values in the literature, depending on the estimation procedure. According to the Directional Distance Function (DDF) approach, the shadow price expresses the opportunity cost necessary to reduce undesirable outputs (pollutants) in production processes.

The DDF is a general form of the performance Distance Function (DF) first proposed by Shephard and is a generalised representation of the radial data envelopment analysis model. The DDF allows the direction of change of desirable output and undesirable output to be observed simultaneously and only guarantees maximum efficiency when desirable output reaches a maximum and undesirable output reaches a minimum (Wu and Lin, 2019). Both parametric and non-parametric methods can be used to solve the DDF model.

A widely tested DDF is the Directional Environmental

Production Frontier Function (DEPFF). This function measures the distance between the actual production points and the area of the actual production frontier to provide shadow prices of CO<sub>2</sub> emissions.

Recently, the DEPFF has found widespread use because it employs generally available and readily available input and output prices (Wang et al., 2016). On the other hand, results can vary considerably depending on the choice of method (parametric and non-parametric), the data sample and the time interval in which the data fall.

The literature analysis is conducted in the order of the different models adopted and is summarised in Table 1.

### 3.3 Carbon Market Price

In addition to approaches (i) and (ii), an approximation of the value of the ecosystem service of CO<sub>2</sub> sequestration can be defined by the price of carbon dioxide (approach iii) established in so-called Regulated

or Voluntary Carbon Markets.

The Emissions Trade, regulated by the European Union Emissions Trading Scheme and introduced in Europe in 2005 by the Kyoto Protocol, is the world's largest market for trading CO<sub>2</sub> emission allowances. This market involves the trading of emission allowances between companies and governments with the aim of profiting from unused allowances (equal to CO<sub>2</sub> not emitted) or to meet regulatory targets. In fact, for every tonne of CO<sub>2</sub> emitted by companies, over and above those granted, the scheme requires the purchase of a certain number of certificates, the price of which is determined on the market according to supply and demand, the latter being regulated by the European Commission. The equilibrium price in the permit market, defined as a carbon credit, is therefore comparable to the marginal cost of abating one tonne of CO<sub>2</sub>. This price, compared to the initial value in 2005 of around € 20/tonne of CO<sub>2</sub>, has risen sharply over the four-year period 2018-2022 to around € 80/tonne.

**Table 1 - Reference literature for estimating the value of CO<sub>2</sub>**

Study	Year	Methodology	Model	Level of analysis	Value [t/CO <sub>2</sub> ]
US Environmental Protection Agency (EPA, 2016)	2030 2050	Social Cost	IAMs <sup>a</sup>	US	16-152 \$ 26-212 \$
Dietz and Stern (2015)	2015 2035	Social Cost	IAM <sup>b</sup>	Global	32-103 \$ 82-260 \$
Kalkuhl and Wenz (2020)	2020 2030	Social Cost	IAM	77 Countries	73-142 \$ 92-181 \$
Rennert et al. (2022)	2020	Social Cost	IAM <sup>c</sup>	US	44-413 \$
Pindyck (2019)	2019	Social Cost	Sondaggi tra esperti del settore	Global	80-300 \$
Qi et al. (2004)	1980- 2000	Shadow Cost	DF <sup>d</sup>	44 Countries	308,5 \$
Salnykov and Zelenyuk (2005)	1995- 2000	Shadow Cost	DF	96 Countries	133-478 \$
Dang and Mourougane (2014)	1990- 2008	Shadow Cost	DF	19 Countries	240-786 \$
Marklund and Samakovlis (2007)	1990- 2000	Shadow Cost	DDF <sup>e</sup>	15 EU Countries	670
Wang et al. (2011)	2007	Shadow Cost	DDF	China	71,3 \$
Du et al. (2012)	2001-2010	Shadow Cost	DDF	China	157,03 \$
Wei et al. (2013)	2004	Shadow Cost	DDF	China	248,9 \$
Wu and Lin (2019)	2006-2015	Shadow Cost	DEPFF <sup>f</sup>	China	157,14 \$

<sup>a</sup> Integrated Assessment Models (DICE, PAGE, FUND)

<sup>b</sup> Dynamic integrated climate-economy model (DICE)

<sup>c</sup> Greenhouse Gas Impact Value Estimator open-source model (GIVE)

<sup>d</sup> Distance function (DF)

<sup>e</sup> Directional distance function (DDF)

<sup>f</sup> Directional Environmental Production Frontier Function (DEPFF)

The Voluntary Carbon Market, on the other hand, is a market that emerged in parallel with the implementation of the Kyoto Protocol for those sectors not covered by the regulated market. It is, therefore, a fundamental economic reality for companies, businesses, and entities, public or private, that want to make a real contribution to the fight against climate change and sustainable development objectives.

Aiming at so-called Carbon Neutrality, the main market players, through constant research into innovative solutions, seek to zero their environmental impact by reducing their emissions. Companies or entities, for which it is physically and/or financially impossible to reach certain pre-established emission targets, proceed to offsetting (Carbon Offsetting): the latter is a mechanism to compensate for their CO<sub>2</sub> emissions by supporting certified emission reduction projects. This mechanism is implemented through the purchase of carbon credits, where one credit corresponds to one tonne of CO<sub>2</sub> absorbed or avoided by the project.

According to Gold Standard, the minimum price of carbon credits in the voluntary market currently ranges from 8.20 €/tCO<sub>2</sub> for energy efficiency projects to 13 €/tCO<sub>2</sub> for forestry projects.

Today, an increasing number of specialised brokerage agencies (Carbon Brokers) have sprung up around the world, assisting investors both in reducing their domestic emissions and in finding the best partners for acquiring carbon credits to bring their emissions to zero.

The use of the price set in carbon markets is a method of monetary valuation of CO<sub>2</sub> that has clear advantages in terms of speed of estimation, proving to be mainly suitable for large-scale expeditious valuation. At the same time, however, it suffers from the failure to take into account the social component and the extreme variability of the reference price, both in the medium and short term (Ingaramo et al., 2017).

#### 4. METHODOLOGY

The study aims at mapping and economically evaluating the CO<sub>2</sub> sequestration function of forests over a large area. To this end, a methodology is defined based on four steps summarised in Figure 1.

All information, data and estimated values concerning the model steps are represented on Geographic Information System (GIS).

The phases of the methodological framework are detailed below.

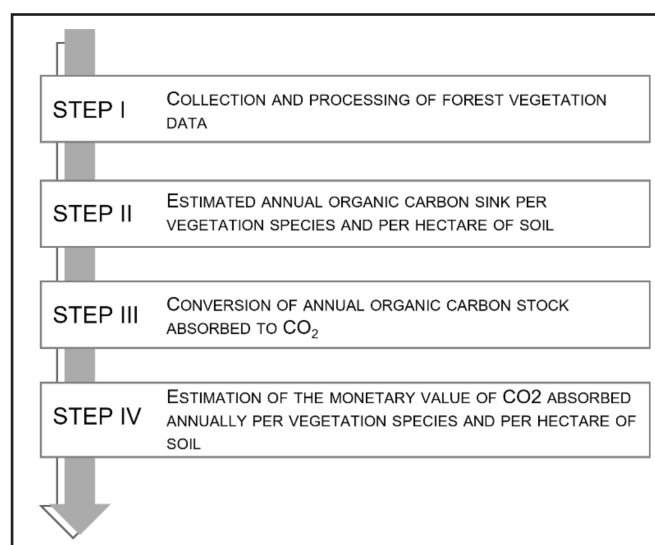
##### **Step I - Collection and processing of data on the forest categories of the area under analysis.**

With reference to the vast area under study, the first step involves the collection of information on the forest

heritage and the corresponding forest categories: categories defined by the prevalence of a single arboreal species or by the coexistence of two or more arboreal specie.

For this purpose, in Italy valid references are the Regional Forest Map and the Charter for Nature. The latter, in particular, requires further data processing to group the habitats in which it is classified into forest categories.

The spatial information collected then needs georeferencing activities.



**Figure 1 - Outline of the proposed methodological framework (Source: our elaboration).**

##### **Step II - Estimation of annual organic carbon removal and storage per forest category and per hectare of soil.**

According to Section 2, to account for the annual removal and storage of organic carbon, for each forest category and per hectare of soil, it is necessary to consider the annual increment of the five types of carbon pools indicated by the IPPC (2020): epigeous biomass, hypogean biomass, necromass, litter and soil.

In detail, the IPPC defines the annual increase  $C$  of the stock of organic carbon due to the expansion in forest soils of biomass, epigeal and hypogean:

$$\Delta C_{FFG} = \sum_{ij} (A_{ij} \cdot G_{TOT,ij}) \cdot CF \quad (1)$$

Where:

- $\Delta C_{FFG}$  (tC/year) represents the annual increase in carbon stocks due to the increase in epigeal biomass and hypogean biomass by forest type and climate zone;

- $A_{ij}$  (ha) indicates forest area per type (i) and climate zone (j);
- $G_{TOTij}$  (td.m. ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>) is the average annual increase in total biomass in dry matter units, by forest type (i) and climate zone (j);
- CF (tC) represents the carbon fraction of 50 per cent of the dry weight.

In turn, the average annual  $G_{TOT}$  increase of biomass is given by the IPCC as:

$$G_{TOT} = G_W \cdot (1+R) \quad (2)$$

$$G_W = I_V \cdot D \cdot BEF \quad (3)$$

In which:

- $G_W$  (td.m. ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>) is the average annual increase in epigeal biomass;
- R indicates the dimensionless root/shoot ratio that converts epigeal biomass to hypogean biomass per forest type;
- $I_V$  (m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>) represents the average annual net increase in volume;
- D (td.m/m<sup>3</sup>) is the basic density of wood;
- B-EF indicates the Biomass Expansion Factor, i.e. the dimensionless factor for volume conversion to epigeous tree biomass.

With reference to the IPCC and the methodology proposed by Federici et al. (2008), we define the annual increase C of the stock as a result of the annual expansion of necromass as:

$$\Delta C_{FFC} = \sum_{ij} (A_{ij} \cdot G_{Dij}) \cdot CF \quad (4)$$

In which, the average annual GD increase in the necromass is:

$$G_D = G_W \cdot DCF \quad (5)$$

Where:

- $G_W$  (td.m. ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>) is the average annual increase in epigeal biomass;
- DCF indicates the Dead mass Conversion Factor that converts underground biomass into necromass.

Finally, with regard to soil and litter, it is possible to estimate, by means of linear relationships differentiated by forest use, the annual increase in C stock from the same quantity estimated for epigeal biomass (Federici et al., 2008).

In Italy, for Step II of the study methodology, a valid reference is provided by the INFC, which estimates the amount of organic carbon removed and stored annually by growth of the epigeal component.

### Step III - Converting the annual organic carbon stock removed and stored into CO<sub>2</sub>.

To convert the amount of annual organic carbon removed and stored by each forest category into CO<sub>2</sub>, and therefore per hectare of soil, we proceed analytically according to the relationship:

$$tCO_2 = 3,67 \cdot tC \quad (6)$$

Where the amount of carbon dioxide (tCO<sub>2</sub>) is obtained by multiplying organic carbon (tC) by the ratio of the molecular weights of carbon dioxide and elemental carbon (44/12=3.67).

### Step IV - Estimation of the monetary value of CO<sub>2</sub> absorbed annually per forest category and per hectare of land.

This estimation is to be carried out using one of the procedures described in Section 3, chosen according to the research aim and taking into account the limitations and advantages of each approach. The monetary value obtained, multiplied by the CO<sub>2</sub> stock (t ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>), returns the spatial distribution of the monetary values relative to the average annual flow of carbon dioxide fixed by the forest ecosystem.

The methodology described aims, therefore, to map and economically evaluate the carbon dioxide sequestration service over a vast area. Innovations in the approach concern: (i) the use of forest categories to determine the quantities of CO<sub>2</sub> absorbed; (ii) the automation of processing without recourse to external software. These are aspects that differentiate the present research from literature studies that set themselves the same goal. The reference is to the analysis carried out for the Sardinia Region by Ingaramo et al. (2017) who, using the Land Use Map, assess and map the carbon sequestration function by analysing, with a lower level of detail, the following forest categories: broadleaf, cork oak forest, chestnut groves, broadleaf arboriculture, coniferous, coniferous arboriculture, mixed.

Again, for the Molise Region, Sallustio et al. (2015) apply the InVEST Carbon Storage software, as do Pilogallo and Scorza (2021) for the Basilicata Region. This free software, developed by Natural Capital Project, calculates the carbon storage and sequestration service. The information inputs required for its execution are the Land Use Map, in raster format, and a table with data concerning, for each pixel of the map, the amount of carbon absorbed by: epigeal biomass, hypogean biomass, litter and soil of the vegetation present. A limitation for the application of InVEST is certainly the need for knowledge of GIS software.

Widely used is the i-Tree Eco tool from the free i-Tree software suite, although it is oriented towards

processing over less extensive areas, compared to those investigated in this research, and mainly for urban planning purposes. Here, the requirement for very detailed input data (forest species, stem diameter, height of the tree from ground level, etc.) can be a limitation for large area analysis.

## 5. CASE STUDY: MAPPING AND ECONOMIC EVALUATION OF THE CO<sub>2</sub> SEQUESTRATION FUNCTION IN CAMPANIA REGION (ITALY)

The ecosystem service of CO<sub>2</sub> sequestration was mapped and economically evaluated with reference to the territory of the Campania Region, Italy. The forest ecosystem under study covers approximately 30% of the regional surface area, with an extension of approximately 440,000 ha.

### Step I

With reference to Step I of the methodological framework, data from the Nature Map of the Campania Region, provided by ISPRA at scales 1:50,000 and 1:25,000 (Bagnaia et al. 2017), were collected and processed with the use of QGIS software.

Specifically, among the habitats reported in the Nature Map, reference was made to the 'Forests and Woods' habitats and the related information regarding their extension in hectares.

Later, thanks to the Forest Vegetation Classification Guide (INFC, 2003), these habitats were grouped into the forest categories adopted by the National Forest Inventory. This allowed a clearer representation and consistency with the terminology adopted by the National Forest Inventory used as a reference for Phase II.

Figure 2 represents the elaboration of the data concerning the forest vegetation of the area under analysis. In detail, it emerges how in the vicinity and in the areas of the main cities of Campania, such as Naples, Caserta, Salerno, Avellino and Benevento, there is a lack of vegetation cover. This is also evident to the east of the Region, on the border with Basilicata, where the municipalities of Sala Consilina and Teggiano are located. Conversely, the richness of forest species emerges mainly in the protected areas of the Region and in the areas of the regional and national parks: Roccamonfina Regional Park - Foce Garigliano, Matese Regional Park, Taburno Camposauro Regional Park, Partenio Regional Park, Monti Picentini Regional Park, Cilento, Vallo di Diano and Alburni National Park. What also emerges is the great wealth, in forestry terms and, therefore, in terms of ecosystem services, of the areas long defined as 'marginal': in these territories, in fact, a large part of Italy's natural resources is preserved. It is no coincidence that it is in these small towns that the first significant examples of circular economy practices

were recorded, thanks to their close relationship with nature and local culture.

Table 2 shows the extent of the forest categories seen in Figure 2, both in hectares and as a percentage of the total wooded area.

**Table 2 - - Extension of the forest categories of the Campania Region**

Forest category	Area [ha]	Area [% of total wooded area]
Silver fir forests	90,33	0,02
Other coniferous forests, pure or mixed	2.261,65	0,59
Cerrete and hungarian oak forests	102.894,00	26,86
Mediterranean pine forests	2.448,70	0,64
Hygrophilous forests	12.147,60	3,17
Pubescent oak forest	59.623,70	15,57
Chestnut groves	51.100,60	13,34
Cork oak forest	727,05	0,19
Other deciduous forests	11.917,30	3,11
Leccete	35.902,40	9,37
Ostrieti and hornbeam	38.651,20	10,09
Beech forests	65.226,00	17,03

### Step II

To estimate the annual removal and storage of organic carbon, per forest category and hectare of soil, reference was made to the National Forest Inventory (2005). The latter, as mentioned in Section 4, estimates the average amount of organic carbon that a hectare of land removes annually from the atmosphere by storing it in newly formed plant tissues. In the absence of data on the volumetric expansion of roots and carbon stored in soil and litter, the sequestration process is estimated only for the epigeal component of forests.

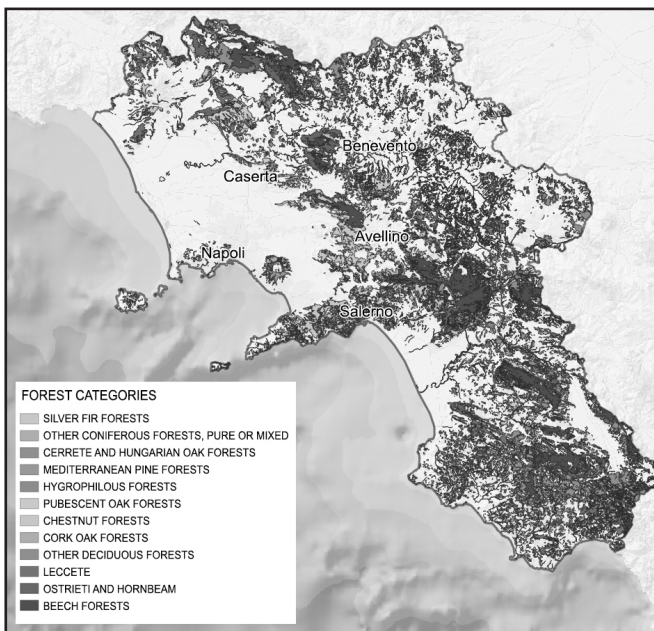
The results are summarised in Figure 3.

### Step III

Subsequently, as envisaged in Step III, through Equation 6 in Section 4 ( $T_{CO_2}=3.67 T_c$ ), the average amount of carbon dioxide absorbed annually per hectare of soil and per forest category was estimated. The results obtained are shown in Figure 4.

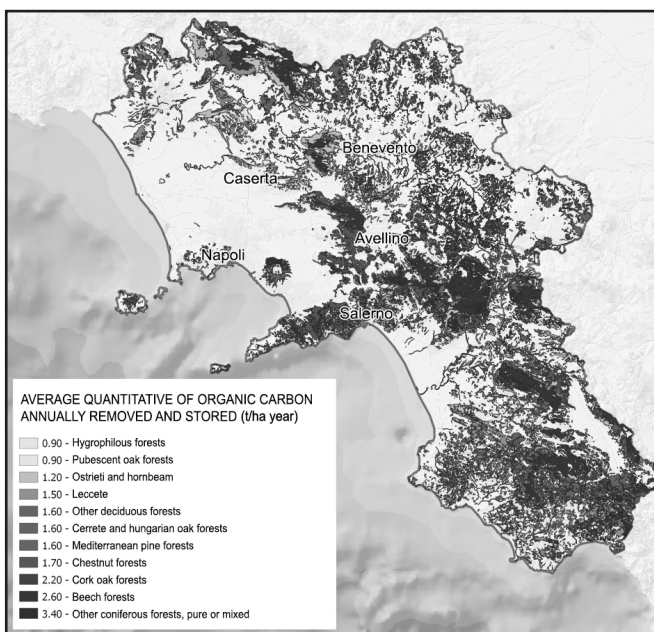
Consistent with what emerged from Figure 2, Figures 3





**Figure 2** - Cartographic representation of the forest categories of the Campania Region. (Source: our processing with QGIS software).

and 4 show an annual removed and stored amount of organic carbon, and therefore an absorbed amount of carbon dioxide, that is greater in the areas near the protected areas and parks mentioned above. Furthermore, the spatial representations confirm a greater air healthiness and a high level of environmental



**Figure 3** - Cartographic representation of the average amount of average organic carbon annually removed and stored by forest category (Source: our processing with QGIS software).

well-being in inland areas; this is in contrast to the highly polluted large urbanised areas.

#### Step IV

The last step of the methodological framework concerned the estimation of the monetary value of the ecosystem service under study provided by the forest heritage of the Campania Region. About the estimation procedures described in Section 3, the economic valuation of the ecosystem service made use of the market price of emission permits, as regulated by the European Union Emissions Trading Scheme. Currently, in the most recent European Emissions Allowance Auction Report (2022), the average CO<sub>2</sub> price reported is 82 euros/tonne, significantly higher than the average price of 39 euros/tonne in 2021.

As mentioned in Section 3, the choice of reference to the emissions market has clear advantages in terms of speed of estimation, adapting to the present expeditious assessment on a regional scale.

Finally, the average CO<sub>2</sub> price was multiplied by the CO<sub>2</sub> stock (t ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>) estimated in the previous step: this yielded the spatial distribution of the monetary values for the average annual CO<sub>2</sub> flux set by the forest ecosystem in Campania (Figure 5).

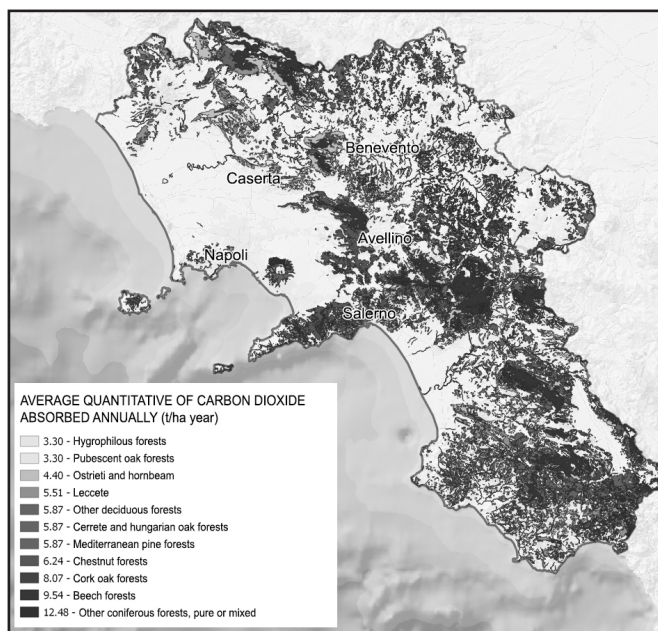
The implementation of the methodology returns for the Campania Region an extension of the forest heritage equal to about 370,000 hectares, which annually absorbs a quantity of 2,172,800 tons of CO<sub>2</sub>, for an economic consideration of 178,172,560 euros taking as reference the regulated market.

## 6. DISCUSSIONS

The results obtained from the methodological application confirm the importance of ecosystem services as a source of environmental and economic benefits.

Analysing the Campania regional capitals: Avellino shows the highest absorption figures, equal to about 43,500 tCO<sub>2</sub> annually for an economic value of 3,567,000 euro; Salerno absorbs 14,850 tCO<sub>2</sub> annually, equal to 1,217,700 euro; this is followed by Benevento with an annual absorption of 14,100 tCO<sub>2</sub>, corresponding to 1,156,200 euro; Caserta absorbs 6,000 tCO<sub>2</sub> per year, for 492,000 euro; lastly, Naples, with the lowest values, has an absorption of 3,620 tCO<sub>2</sub>/year, corresponding to 296,840 euro.

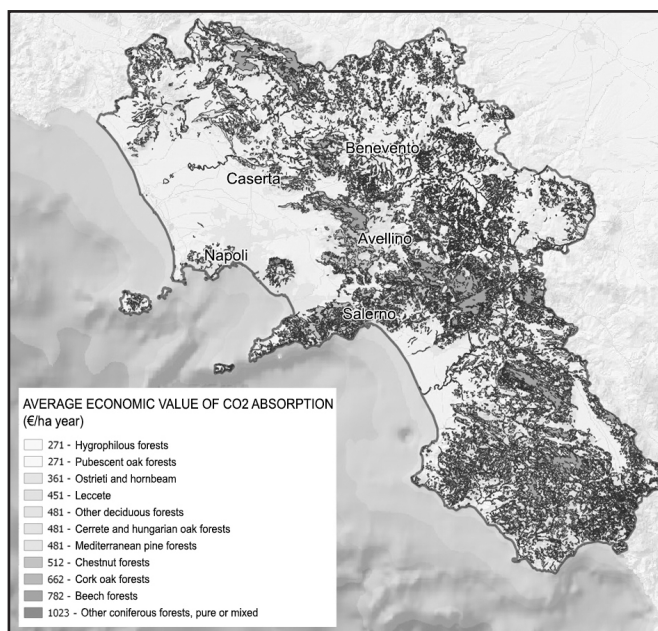
It is interesting to compare with the data from the inland areas: the Cilento Interno records the highest data, absorbing 348,800 tCO<sub>2</sub>/year for a value of 28,601,600 euro; Alta Irpinia absorbs 320.780 tCO<sub>2</sub> per year for a value of 26,303,960 euro; followed by Vallo di Diano absorbs 317,370 tCO<sub>2</sub> per year for a value of 26,024,340 euro; last the Tammaro-Titerno area with an absorption



**Figure 4** - Cartographic representation of the average amount of carbon dioxide absorbed annually by forest category. (Source: our processing with QGIS software).

of 252,560 tCO<sub>2</sub> per year for a value of 20,709,920 euro.

The data show a great richness of forest categories in marginal areas where, consequently, a higher level of air health and environmental well-being is confirmed.



**Figure 5** - Cartographic representation of the average economic value, by forest category, of the average annual CO<sub>2</sub> absorption. (Source: our processing with QGIS software).

Acknowledging and estimating the economic value of the ecosystem service means, therefore, also being able to lay the foundations for implementing sustainable development programmes for inland areas: the economic value of the ecosystem service is a potential source of economic resources to be deployed for programmes to redevelop ecosystems and the inland areas that protect them.

The latter have long been affected by a serious depopulation phenomenon linked mainly to the absence or inadequacy of essential infrastructure and services.

In this regard, the Payments for Ecosystem Services (PES) governance approach would be an excellent economic policy tool aimed at recognising, through the activation of financial flows, the valuable role of inland areas as main sources of ecosystem service provision for the benefit of the entire country. This would also make it possible to re-establish an economic balance between the populations committed to the protection and conservation of the ecosystem and those who, on the other hand, continue to unsustainably exploit natural resources (Wunder, 2008).

## 7. CONCLUSIONS

The role of ecosystem services is a topic of interdisciplinary study that has become, especially in recent years, central to debates concerning the environment, climate emergency and sustainable development strategies.

Natural capital, capable of providing wellbeing to mankind, is subject to continuous exploitation by people, leading to a significant transformation of ecosystems and a consequent loss of biodiversity across the planet.

With the aim of protecting our territory and acting on it in a more sustainable manner, a governance approach that has emerged in recent years is that of Payments for Ecosystem Services, the application of which requires an estimate, in monetary terms, of the services provided by each ecosystem.

In line with what has been expressed, the present paper aims to characterise a methodology for mapping and the economic evaluation of one of the main ecosystem services: the sequestration of carbon dioxide by the forest heritage over a vast area.

The methodological framework is divided into four phases: the collection and processing of data on the forest categories of the area under analysis; the estimation of the annual removal and storage of organic carbon per forest category and hectare of soil; the conversion into CO<sub>2</sub> of the stock of organic carbon annually removed and stored; the estimation of the monetary value of CO<sub>2</sub> absorbed annually per forest category and hectare of soil.

## Forest ecosystem services: economic evaluation of carbon sequestration on a large scale

The application of the methodology concerned the Campania Region whose forest heritage, covering 370,000 hectares, absorbs 2,172,800 tonnes of CO<sub>2</sub> annually, for an economic consideration of 178,172,560 euro according to regulated market values.

In contrast to the literature, assessment and mapping over a large area is here carried out at a greater level of detail and without recourse to external software. In fact, unlike the approaches that characterise already available software, such as InVEST or i-Tree Eco, the methodological framework is developed here for the first-time using forest categories as a reference, with the aim of drawing up an operational model aimed at a rapid measurement of the CO<sub>2</sub> absorbed in a given territorial

area and at estimating the corresponding monetary value.

In a research perspective, we intend to characterise a new software based on the estimation algorithms of the defined methodology. Specifically, this is a user-friendly software that, unlike the applications already available, requires as its only input the perimeter map of the survey area and can immediately return the measurement of the quantity of CO<sub>2</sub> annually absorbed by the forest heritage and the forecast of the relative economic value. The aim is to make the tool easy to use for public administrations, local associations and even citizens, thereby increasing awareness of the crucial role of ecosystem services in climate change.

### Acknowledgements

*The article is the result of research activities conducted with funding from the interUniversity Centre for the Prediction and Prevention of Major Hazards (C.U.G.RI), established by the Rectors of the University of Salerno and the University of Naples 'Federico II'.*

\* **Federica Russo**, University of Salerno, Department of Civil Engineering  
e-mail: frusso@unisa.it

\*\* **Gabriella Maselli**, University of Salerno, Department of Civil Engineering  
e-mail: gmaselli@unisa.it

\*\*\* **Antonio Nesticò**, University of Salerno, Department of Civil Engineering  
e-mail: anesticò@unisa.it

### Authors' contributions

*The present work is to be attributed in equal parts to the three authors.*

### Bibliography

ANTHOFF D., TOL R.S.J., *The uncertainty about the social cost of carbon: A decomposition analysis using FUND*, Climate Change 117, 2013, pp. 515–530. doi:10.1007/s10584-013-0706-7

BAGNAIA R., VIGLIETTI S., LAURETI L., GIACANELLI V., CERALLI D., BIANCO P.M., LORETO A., LUCE E., FUSCO L., *Carta della Natura della Regione Campania: Carta degli habitat alla scala 1:25.000*, ISPRA, 2017.

BARDE J.P., PEARCE D., *Valutare l'ambiente. Costi e benefici nella politica ambientale*, Il Mulino, Bologna, 1993.

CANADELL J.G., LE QUERE C., RAUPACH M.R., FIELD C.B., BUITENHUIS E.T., *Contributions to accelerating atmospheric CO<sub>2</sub> growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks*, Proceedings of the National Academy of Sciences, Vol. 104, No. 47, 2007, pp. 18866–18870.

CESARO L., ROMANO R., MARONGIU S., *RAF Italia - 2017-2018. Rapporto sullo stato delle foreste e del settore forestale in Italia*, Compagnia delle Foreste S.r.l, 2019.

CLARK K.L., GHOLZ H.L., CASTRO M., *Carbon dynamics along a chronosequence of slash pine plantations in North Florida*, Ecological Applications, Vol. 14, No. 4, 2004, pp. 1154–1171.

COSTANZA R., D'ARGE R., DE GROOT R., FARBER S., GRASSO M., HANNON B., LIMBURG K., NAEEM S., O'NEILL R.V., PARUELO J., RASKIN R.G., SUTTON P., VAN DEN BELT M., *The value of the world's ecosystem services and natural capital*, Nature, Vol. 387, 1997, pp. 253–260.

COSTANZA R., DE GROOT R., SUTTON P., VAN DER PLOEG S., ANDERSON S. J., KUBISZEWSKI I., TURNER R. K. *Changes in the global value of ecosystem services*. *Global Environmental Change*, Vol. 26, No. 1, 2014, pp. 152–158. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2014.04.002

DANG T., MOURougANE A., *Estimating shadow prices of*

*pollution in Selected OECD Countries*, OECD Green Growth Papers, No. 2014/02, OECD Publishing, 2014.

DI COSMO L., TOSI V., PALETTO A., FLORIS A., "I caratteri quantitativi – La terza fase", in Gasparini P., Tabacchi G., (eds.), *L'Inventario Nazionale delle Foreste e dei serbatoi forestali di Carbonio INFC 2005. Secondo inventario forestale nazionale italiano. Metodi e risultati*, Ministero delle Politiche Agricole, Alimentari e Forestali; Corpo Forestale dello Stato. Consiglio per la Ricerca e la Sperimentazione in Agricoltura, Unità di ricerca per il Monitoraggio e la Pianificazione Forestale. Edagricole, Milano, 2011, pp. 54-59.

DIETZ S., STERN N., *Endogenous Growth, Convexity of Damage and Climate Risk, How Nordhaus' Framework Supports Deep Cuts in Carbon Emissions*, *The Economic Journal*, Vol. 125, 2015, pp. 574-620.

DU L., WEI C., CAI S., *Economic development and carbon dioxide emissions in China: Provincial panel data analysis*, *China Economic Review*, Elsevier, Vol. 23, No. 2, 2012, pp. 371-384. DOI: 10.1016/j.chieco.2012.02.004

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA), *Technical Support Document: Technical Update of the Social Cost of Carbon for Regulatory Impact Analysis Under Executive Order 12866*, Interagency Working Group on Social Cost of Greenhouse Gases, United States Government, 2016.

FAO, UNEP, *The State of the World's Forests 2020. Forests, biodiversity and people*, Roma, 2020.

FEDERICI S., VITULLO M., TULIPANO S., DE LAURETIS R., SEUFERT G., *An approach to estimate carbon stocks change in forest carbon pools under the UNFCCC: the Italian case*, *iForest – Biogeosciences & Forestry*, Vol. 1, No. 2, 2008, pp.86-95. DOI: 10.3832/ifor0457-0010086

GAGLIOPPA P., GUADAGNO R., MARINO D., MARRUCCI A., PALMIERI M., PELLEGRINO D., SCHIRPKE U., CARACAUSI C., *L'assestamento forestale basato su servizi ecosistemici e pagamenti per servizi ecosistemici: considerazioni a valle del progetto LIFE+ Making Good Natura*, *Forest@ - Journal of Silviculture and Forest Ecology*, Vol. 14, 2017, pp. 99-106.

GASPARINI P., DI COSMO L., POMPEI E., *Il contenuto di carbonio delle foreste italiane. Inventario Nazionale delle Foreste e dei serbatoi forestali di Carbonio INFC2005. Metodi e risultati dell'indagine integrativa*. Ministero delle Politiche Agricole, Alimentari e Forestali, Corpo Forestale dello Stato; Consiglio per la Ricerca e la Sperimentazione in Agricoltura, Unità di ricerca per il Monitoraggio e la Pianificazione Forestale. Trento, 2013.

HAINES-YOUNG R., POTSCHEIN M.B., *Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) V5.1 and Guidance on the Application of the Revised Structure*, Fabis Consulting Ltd., Nottingham, 2018. DOI: 10.3897/oneeco.3.e27108

HOPE C., (2008). *Discount rates, equity weights and the social cost of carbon*, *Energy Economics* 30 (3), 2013, pp. 1011-1019. DOI:10.1016/j.eneco.2006.11.006

INFC, *Guida alla classificazione della vegetazione forestale. Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio*, ISAFA, Trento, 2003.

INGARAMO R., SALIZZONI E., VOGHERA A., *Valuing forest ecosystem services for spatial and landscape planning and design*, *Valori e Valutazioni*, No. 19, 2017, pp. 65-68.

KALKUHL M., WENZ L., *The impact of climate conditions on economic production. Evidence from a global panel of regions*, *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 103, 2020, DOI: 10.1016/j.jeem.2020.102360

KHABAROV N., SMIRNOV A., OBERSTEINER, M., *Social cost of carbon: A revisit from a systems analysis perspective*. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10:923631. DOI: 10.3389/fenvs.2022.923631

LINK P.M., TOL R.S.J., *Possible economic impacts of a shutdown of the thermohaline circulation: an application of FUND*, *Portuguese Economic Journal* 3(2), 2004, pp. 99-114.

MAGNANI F., RADDI S., *Afforestation and CO<sub>2</sub> fixation: a few reference figures from scientific research*, *Forest@ - Journal of Silviculture and Forest Ecology*, Vol. 18, 2021, pp. 60-63.

MARKLUND P-O., SAMAKOVLIS E., *What is driving the EU burden-sharing agreement: efficiency or equity?*, *Journal of Environmental Management*, Vol. 85, No. 2, 2017, pp. 317-329. DOI: 10.1016/j.jenvman.2006.09.017

MASELLI G., NESTICÒ A., *A probabilistic model for the estimation of Declining Discount Rate [Un modello probabilistico per la stima del saggio di sconto declinante]*, *Valori e Valutazioni* n. 24, 2020, pp. 181-194, ISSN: 2036-2404. <https://siev.org/14-24-2020/>

MAVSAR R., VARELA E., PETTENELLA D., VEDEL S.E., JACOBSEN J.B., "The Value of Carbon Sequestration", in Thorsen B.G., Mavsar R., Tyrvaainen L., Prokofiev I., Stenger A. (eds.), *The Provision of Forest Ecosystem Services. Volume I: Quantifying and valuing non-marketed ecosystem services*, European Forest Institute, Joensuu, Finland, 2014.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT, *A Report of the Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-Being*, Island Press, Washington DC, 2005.

MOORE F.C., RISING J., LOLLO N., SPRINGER C., VASQUEZ V., DOLGINOW A., HOPE C., ANTHOFF D., *Mimi-PAGE, an open-source implementation of the PAGE09 integrated assessment model*, *Scientific Data*, 2018. DOI: 10.1038/sdata.2018.187

MURADIAN R., CORBERA E., PASCUAL U., KOSOY N., MAY P., *Reconciling theory and practice: an alternative conceptual framework for understanding payments for ecosystem services*, *Ecological Economics*, Vol. 69, No. 6, 2010, pp. 1202-1208. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2009.11.006

NESTICÒ A., MASELLI G., *A protocol for the estimate of the social rate of time preference: the case studies of Italy and the USA*. *Journal of Economic Studies*, Vol. 47, No. 3,

2020, pp. 527-545. <https://doi.org/10.1108/JES-02-2019-0081>  
PEARCE D., *The social cost of carbon and its policy implications*. *Oxford Review of Economic Policy*, Vol. 19, No. 3, 2003, pp. 362-384. doi:10.1093/oxrep/19.3.362

PEARCE D., *The Social and Economic Value of Construction: The Construction Industry's Contribution to Sustainable Development*, *Open Journal of Business and Management*, 2016, Vol. 4, No. 4.

PENMAN J., GYTARSKY M., HIRAISHI T., KRUGG T., KRUGER D., PIPATTI R., BUENDIA L., MIWA K., NGARA T., TANABE K. AND WAGNER F., *Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry*, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2003.

PILOGALLO A., SCORZA F., *Regulation and Maintenance Ecosystem Services (ReMES): A Spatial Assessment in the Basilicata Region (Southern Italy)*, *Computational Science and Its Applications-ICCSA 2021*, Vol. 12955, 2021, pp. 703-716. DOI:10.1007/978-3-030-87007-2\_50

PINDYCK R.S., *The social cost of carbon revisited*, *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 94, 2019, pp. 140-60.

PRICE R., THORNTON S., NELSON S., *The Social Cost of Carbon and the Shadow Price of Carbon What they are, and how to use them in economic appraisal in the UK*, MPRA Paper 74976, University Library of Munich, Germany, 2007.

QI S., XU L., COGGINS J., *Deriving Shadow Prices of Environmental Externalities*, University of Minnesota, 2004.

RENNERT K., ERRICKSON F., PREST B. C., RENNELS L., ET AL. *Comprehensive Evidence Implies a Higher Social Cost of CO<sub>2</sub>*, *Nature*, 2022. DOI:10.1038/s41586-022-05224-9.

SALLUSTIO L., QUATRINI V., GENELETTI D., CORONA P., MARCHETTI M., *Assessing land take by urban development and its impact on carbon storage: Findings from two case studies in Italy*, *Environmental Impact Assessment Review*, Vol. 54, 2015, pp. 80-90. DOI: 10.1016/j.eiar.2015.05.006

SALNYKOV M., ZELENYUK V., *Estimation of Environmental Efficiencies of Economies and Shadow Prices of Pollutants in Countries in Transition*, EERC Working Paper Series 05-06e, EERC Research Network, Russia and CIS, 2005.

SOMOGYI Z., CIENCIALA E.E., MAAKIPAA E.R., MUUKKONEN P., LEHTONEN A., WEISS P., *Indirect methods of largescale forest biomass estimation*, *European Journal of Forest Research*, Vol. 126, 2007, pp. 197-207.

STERN N., *The Economics of Climate Change: The Stern Review*, Cambridge University Press, Cambridge and New York, 2007.

STERN N., STIGLITZ, J., *The Social Cost of Carbon, Risk, Distribution, Market Failures: An alternative approach*, NBER Working Paper, No. 28472, 2021.

TABACCHI G., DI COSMO L., GASPARINI P., *Aboveground tree volume and phytomass prediction equations for forest species in Italy*, *European Journal of Forest Research*, Vol. 130, No. 6, 2011, pp. 911-934.

TEEB, *The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Ecological and Economic Foundations*, Earthscan, London, 2010.

TOL R.S., *A social cost of carbon for (almost) every country*, *Energy Economics*, Vol. 83, 2019, pp. 555-566. DOI: 10.1016/j.eneco.2019.07.006

WANG Q., CUI Q., ZHOU D., WANG S., *Marginal abatement costs of carbon dioxide in China: a nonparametric analysis*, *Energy Procedia*, Vol. 5, 2011, pp. 2316-2320.

WANG S., CHU C., CHEN G., PENG Z., LI F., *Efficiency and reduction cost of carbon emissions in China: A non-radial directional distance function method*, *Journal of Cleaner Production*, 113, 2016, pp. 624-634.

WEI C., LÖSCHEL A., LIU B., *An empirical analysis of the CO<sub>2</sub> shadow price in Chinese thermal power enterprises*, *Energy Economics*, Vol. 40, 2013, pp. 22-31. DOI: 10.1016/j.eneco.2013.05.018

WU Q., LIN H., *Estimating Regional Shadow Prices of CO<sub>2</sub> in China: A Directional Environmental Production Frontier Approach*, *Sustainability*, Vol. 11, 2019, pp. 1-19. DOI: 10.3390/su11020429

WUNDER S., *Payments for environmental services and the Poor: Concepts and preliminary Evidence*, *Environment and Development Economics*, Vol. 13, No. 3, 2008, pp. 279-297. DOI: 10.1017/S1355770X08004282

ZHANG Y., GU F., LIU S., LIU Y., LI C., *Variation of carbon stocks with forest types in subalpine region of southwestern China*, *Forest Ecology Management*, Vol. 300, 2013, pp. 88-95.

**Tommaso Emler**

# **ICT** **per il Cultural Heritage**

Rappresentare, Comunicare, Divulgare



[www.build.it](http://www.build.it)

**dei**  
TIPOGRAFIA DEL GENIO CIVILE

# Servizi ecosistemici forestali: valutazione economica del sequestro di anidride carbonica su area vasta

Federica Russo\*, Gabriella Maselli\*\*,  
Antonio Nesticò\*\*\*

*Parole chiave:* servizi ecosistemici forestali,  
pagamenti per i servizi ecosistemici, sequestro di CO<sub>2</sub>,  
valutazione economica

## Abstract

*Il ruolo dei servizi ecosistemici è un tema di grande rilevanza e centralità nei dibattiti attuali riguardanti l'ambiente, l'emergenza climatica e le strategie di sviluppo sostenibile. Il capitale naturale, fonte inestimabile di benessere per il genere umano, è vittima di un continuo insostenibile sfruttamento da parte dell'uomo; ciò comporta una significativa trasformazione degli ecosistemi e una conseguente perdita di biodiversità in tutto il Pianeta. Negli ultimi anni, una maggiore sensibilizzazione in materia ambientale ha generato grande attenzione all'attivazione di uno strumento finanziario finalizzato alla conservazione e alla valorizzazione degli ecosistemi: il Pagamento dei Servizi Ecosistemici (Payments for Ecosystem Services, PES). Sebbene l'obiettivo principale sia la tutela del nostro territorio e delle sue risorse, gli schemi PES possono inoltre contribuire a ridurre le disuguaglianze, ad alleviare la povertà e a migliorare i mezzi di sussistenza, in particolare se inseriti in efficaci strategie di sviluppo sostenibile. Requisito preliminare per l'applicazione di tale strumento è la valutazione economica degli ecosistemi e dei servizi da essi svolti, quali oggetto di transazione fra suoi benefi-*

*ciari e fornitori. In tal senso, il presente lavoro caratterizza una metodologia per la mappatura e la valutazione economica di uno dei principali servizi ecosistemici: il sequestro di CO<sub>2</sub> da parte del patrimonio forestale. Quest'ultimo, grazie alla capacità di assorbire e immagazzinare la CO<sub>2</sub> presente nell'atmosfera, assume un ruolo rilevante nella lotta ai cambiamenti climatici. La metodologia proposta si articola in quattro fasi e prevede: (i) la raccolta e l'elaborazione dei dati riguardanti le categorie forestali dell'area oggetto d'analisi; (ii) la stima della rimozione e dell'immagazzinamento annuale del carbonio organico e (iii) la sua conversione in CO<sub>2</sub>, per categoria forestale ed ettaro di suolo; (iv) la stima del valore monetario dello stock di CO<sub>2</sub> annualmente assorbito. La metodologia è applicata al territorio della Regione Campania ed è replicabile in differenti contesti e a diversa scala. Prospettiva del lavoro è la realizzazione di un software che consenta, tramite perimetrazione di un'area su mappa, la misurazione automatica della quantità di CO<sub>2</sub> annualmente assorbita dal patrimonio forestale e il valore monetario del corrispettivo servizio ecosistemico.*

## 1. INTRODUZIONE E SCOPO DEL LAVORO

L'emergenza climatica che il mondo sta affrontando e l'aumento delle emissioni di gas serra hanno stimolato un crescente interesse per il patrimonio forestale e il suo ruolo cruciale nella lotta ai cambiamenti climatici. Le foreste, infatti, grazie alla loro capacità di assorbire e immagazzinare la CO<sub>2</sub> presente nell'atmosfera, forniscono un contributo significativo per la grande sfida climatica dei nostri tempi: a scala globale, bloccano annualmente circa 4 PgC, pari a quasi il 50% della CO<sub>2</sub> annualmente emessa dall'uso dei combustibili fossili (Magnani e Raddi, 2021).

Il sequestro di carbonio è solo uno dei molteplici ed inestimabili benefici ecologici, nonché economici, sociali e sanitari legati al patrimonio forestale. Ciò è da tradurre in una grande attenzione nei confronti di un ecosistema indispensabile per la transizione ecologica e per la conversione in chiave circolare della nostra economia.

Tuttavia, la deforestazione e la degradazione forestale continua a un ritmo allarmante, a scala locale e globale. Secondo quanto riportato nello *State of the World's Forests* (FAO e UNEP, 2020), la deforestazione è una delle principali cause del riscaldamento globale, poiché produce dal 12 al 20% delle emissioni di gas serra.

Il mancato riconoscimento dell'importante ruolo svolto dal patrimonio forestale ha causato a lungo e continua a causare uno sfruttamento insostenibile delle risorse naturali da parte dell'uomo; ne consegue una significativa trasformazione dell'ecosistema e la perdita irreversibile di biodiversità in tutto il Pianeta.

Alla luce di quanto detto, negli ultimi anni una maggiore sensibilizzazione in materia ambientale ha portato gli ecosistemi e i servizi offerti da essi al centro di numerosi dibattiti: in particolare, grande attenzione è stata posta all'attivazione di strumenti finalizzati alla loro conservazione e valorizzazione.

Tra questi strumenti, hanno assunto un ruolo centrale i Pagamenti per i Servizi Ecosistemici (Payments for Ecosystem Services, PES) i quali portano i servizi ecosistemici in un contesto di mercato facendo sì che i beneficiari di un servizio ambientale paghino il fornitore del servizio per assicurarne la continuità o il miglioramento (Muradian et al., 2010).

L'applicazione dei PES necessita alla base di una valutazione economica che contribuisca a rafforzare la comprensione e la comunicazione dei valori del capitale naturale e dei servizi ecosistemici.

In tal senso, il presente studio ha l'obiettivo di delineare un quadro metodologico finalizzato a valutare economicamente uno dei principali servizi ecosistemici forestali, quale il sequestro annuale di anidride carbonica, a scala vasta. La metodologia proposta si articola in quattro fasi e prevede: la raccolta e l'elaborazione dei dati riguardanti le categorie forestali dell'area oggetto d'analisi; la stima della rimozione e dell'immagazzinamento annuale

di carbonio organico, per categoria forestale ed ettaro di suolo; la conversione in CO<sub>2</sub> dello stock di carbonio organico annualmente rimosso ed immagazzinato; la stima del valore monetario della CO<sub>2</sub> assorbita annualmente, per categoria forestale e per ettaro di suolo.

Il ricorso alla Carta della Natura e alle categorie forestali garantisce un livello di dettaglio maggiore rispetto ad analoghi studi che adottano usualmente la Carta dell'Uso del Suolo e le macrocategorie forestali. Inoltre, le metriche proposte sono sviluppate in prospettiva di un'automatizzazione, attraverso la caratterizzazione di un software per il processo di mappatura e valutazione economica del sequestro di CO<sub>2</sub> da parte del patrimonio forestale.

La metodologia proposta è applicata alla Regione Campania, il cui patrimonio forestale è esteso 370.000 ettari. Le analisi restituiscono un valore di 2.172.800 tonnellate di CO<sub>2</sub> assorbite annualmente, per un corrispettivo economico di 178.172.560 euro con riferimento al mercato regolamentato.

Il lavoro è articolato come segue. Il paragrafo 2 descrive la funzione di sequestro di carbonio, quale principale servizio ecosistemico offerto dal patrimonio forestale. Il paragrafo 3 analizza le principali metodologie adottate in letteratura per stimare il valore economico dell'anidride carbonica. Il paragrafo 4 riporta la metodologia di studio elaborata e proposta per la mappatura e la valutazione economica della funzione di sequestro della CO<sub>2</sub> da parte del patrimonio forestale su area vasta. Il paragrafo 5 mostra l'applicazione della metodologia con riferimento al patrimonio forestale della Regione Campania. Infine, il lavoro si conclude con la discussione dei risultati ottenuti e con le riflessioni che ne derivano.

## 2. FUNZIONE DI SEQUESTRO DI CARBONIO

Coprendo circa un terzo della superficie terrestre, oggi il patrimonio forestale rappresenta uno degli ecosistemi più estesi e biologicamente più diversificato sul Pianeta, racchiudendo, infatti, l'80% della biodiversità mondiale. Tale biodiversità custodita è fonte di servizi e benefici essenziali che il patrimonio forestale fornisce all'ambiente e all'uomo.

Trattasi in termini tecnici di servizi ecosistemici, quali *"ecosystem goods (such as food) and services (such as waste assimilation) represent the benefits human populations derive, directly or indirectly, from ecosystem functions"* (Costanza et al., 1997).

Nel dettaglio, tra le prime classificazioni dei servizi ecosistemici, la funzione di sequestro di carbonio rientra in una delle quattro categorie che il *Millennium Ecosystem Assessment* (MEA, 2005) definisce di "regolazione": servizi che promuovono la salute e il buon funzionamento degli ecosistemi, con benefici diretti ed indiretti anche sulla salute umana.

In egual modo, la funzione di sequestro di carbonio è



## Servizi ecosistemici forestali: valutazione economica del sequestro di anidride carbonica su area vasta

inserita all'interno dei servizi di regolazione della classificazione del progetto *The Economics of Ecosystems and Biodiversity* (TEEB, 2010) e della più recente ed internazionale *Common International Classification of Ecosystem Services* (CICES, 2018) che include, ad esempio, servizi di regolazione di gas atmosferici, di prevenzione del dissesto idrogeologico, di regolazione dell'impollinazione ecc. (Gaglioppa et al., 2017; Haines-Young e Potschin, 2018).

Gli ecosistemi forestali sono in grado di conservare anche per periodi di tempo relativamente lunghi il carbonio assimilato. Inoltre, l'uso dei prodotti legnosi consente di mantenere "bloccate" considerevoli quantità di carbonio per tutto il ciclo di vita delle opere e dei manufatti. Le foreste, infatti, attraverso il processo di fotosintesi clorofilliana, catturano l'energia solare convertendo l'anidride carbonica assorbita dall'atmosfera in nutrimento, rilasciando come scarto l'ossigeno.

Secondo quanto riportato dalle *Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry* (IPCC, 2003), al fine di contabilizzare il carbonio assorbito dall'ecosistema forestale, si identificano cinque tipi di deposito di carbonio:

- biomassa epigea, ossia la massa complessiva dei soggetti viventi di specie vegetali presente al di sopra del livello del terreno e costituita da fusti, ceppaie, rami, corteccia, semi e foglie;
- biomassa ipogea costituita dagli apparati radicali;
- necromassa legnosa formata dai tessuti di organismi non più viventi, ancora in piedi o atterrati, o di parti degli stessi organismi (porzioni di tronchi e rami appoggiati al suolo, ceppaie);
- lettiera costituita da residui vegetali a diverso stadio di decomposizione che ricoprono gli strati organici e minerali del suolo;
- suolo che include gli orizzonti organici e minerali fino ad una profondità prestabilita di 30 cm.

Tali pool di carbonio sono fortemente influenzati dal clima, dalla struttura dell'età (Clark et al., 2004), dal tipo di foresta (Somogyi et al., 2007; Zhang et al., 2013), nonché dall'uso del suolo, dal taglio del legname ed altri disturbi naturali e indotti dall'uomo (Canadell et al., 2007).

L'Inventario Nazionale delle Foreste e dei serbatoi forestali di Carbonio (INFC) mette a disposizione i risultati delle indagini operative svolte tra il 2008 e il 2009: attualmente risultano essere i dati più aggiornati in quanto le stime dell'ultimo rapporto saranno disponibili a conclusione dei rilievi a terra.

Tali risultati definiscono la quantità di carbonio organico accumulato nelle foreste italiane e la quantità di carbonio organico assorbito ed emesso annualmente dagli alberi a seguito, rispettivamente, dell'accrescimento delle foreste e dell'asportazione di legna e legname. I valori sono stimati per le regioni italiane e suddivisi in base alle categorie definite dall'inventario: boschi alti, impianti di

arboricoltura da legno e aree temporaneamente prive di soprassuolo (Di Cosmo et al., 2011; Gasparini et al., 2013; Tabacchi e Di Cosmo 2011).

I dati dell'inventario mostrano, all'anno di riferimento, un ammontare complessivo di carbonio organico di 1,24 miliardi di tonnellate, pari a 141,7 t/ha, corrispondenti a 4,5 miliardi di tonnellate di anidride carbonica assorbita dall'atmosfera. La maggior parte del carbonio organico delle foreste italiane è accumulato nei suoli, i quali contengono il 57,6% del totale pari a 715,7 Mt. Segue la biomassa arborea epigea che contiene 472,7 Mt di carbonio, 54,0 t/ha, pari al 38,1% del totale. Infine, nella lettiera e nella necromassa sono accumulati rispettivamente 24,9 e 28,3 Mt di carbonio organico, pari a 2,0% e 2,3% del carbonio totale. Inoltre, per effetto dell'accrescimento degli alberi, sono fissati annualmente 12,6 Mt di carbonio corrispondenti ad un assorbimento di anidride carbonica dall'atmosfera di 46,2 Mt, pari a circa 5 t/ha di CO<sub>2</sub> equivalente (Cesaro et al. 2019).

### 3. VALORE MONETARIO DELLA CO<sub>2</sub>

Attribuire in termini monetari un valore economico alle risorse ambientali è un possibile strumento per la salvaguardia della biodiversità e dei servizi ecosistemici, nonché un punto di partenza per affrontare l'attuale crisi ambientale.

Molti beni e servizi ambientali, come quelli di regolazione, sono però immateriali e non hanno un mercato di riferimento e, di conseguenza, un prezzo di scambio. L'errore a lungo compiuto, infatti, è di ritenere che alcuni servizi ecosistemici mancassero di valore semplicemente perché non immediatamente quantificabili in moneta (Barde e Pearce, 1993; Costanza et al. 2014).

Valutare in termini economici un bene ambientale è, dunque, un processo complesso in cui prendere in considerazione aspetti sia materiali che immateriali.

Per attribuire un valore monetario al servizio ecosistemico di sequestro di CO<sub>2</sub> presente nell'atmosfera, è possibile procedere attraverso l'applicazione di differenti metodologie e modelli da cui conseguono stime con valori spesso molto eterogenei. Dalla disamina della letteratura di settore si rilevano i seguenti approcci di stima: (i) Costo Sociale (*Social Cost of Carbon, SCC*); (ii) Prezzo Ombra (*Shadow Price of Carbon, SPC*); (iii) prezzo di mercato.

L'approccio dell'SCC (i) consiste nella stima del valore sociale del servizio ecosistemico in questione, quantificabile sulla base dei danni sociali evitati con la non emissione o il sequestro di CO<sub>2</sub> nell'atmosfera (Stern, 2007; Mavsar et al., 2014). Trattasi, precisamente, del valore monetario, attualizzato al presente, dei danni globali futuri provocati da un'unità addizionale di gas serra rilasciata nell'atmosfera in un dato anno (Pearce, 2003). Dunque, l'SCC misura l'entità dell'esternalità che deve essere incorporata nelle decisioni sulle politiche e sulle opzioni d'investimento del Governo ed indica quanto la società

sarebbe disposta a pagare ora per evitare i danni futuri causati dalle emissioni incrementalmente di carbonio (Price et al., 2007). Poiché la quantità di danni causati da ogni unità incrementale di carbonio in atmosfera dipende dalla concentrazione di carbonio nell'atmosfera oggi e nel futuro, l'SCC varia a seconda della traiettoria di emissioni e di concentrazione in cui si trova l'intero Pianeta.

Secondo Price et al. (2007) occorre distinguere concettualmente tra SCC, prezzo di mercato del carbonio e Costo Marginale di Abbattimento (*Marginal Abatement Cost*, MAC). Difatti, il prezzo di mercato del carbonio riflette il valore dei diritti di emissione di carbonio scambiati sul mercato (si pensi, ad esempio, al sistema *Emission Trade* dell'UE); il MAC, invece, rappresenta il costo della riduzione delle emissioni, piuttosto che il danno imposto da nuove emissioni.

Secondo gli studiosi, l'approccio dell'SCC pone due principali difficoltà teoriche: in primo luogo, la traiettoria di emissione e la conseguente traiettoria di stabilizzazione su cui si trova il pianeta è funzione delle emissioni globali. Quindi, la stima di un SCC per un Paese implica la formulazione di ipotesi sulle azioni di altri Paesi; in secondo luogo, nonostante i recenti progressi nella modellazione, c'è una notevole incertezza sull'SCC associato a un particolare obiettivo di stabilizzazione e non c'è garanzia che questo valore consenta l'abbattimento utile per raggiungere l'obiettivo prefissato.

Per entrambe le ragioni, Price et al. (2007) suggeriscono di ricorrere all'approccio (ii) dell'SPC. Tale approccio si basa sull'SPC, applicando però aggiustamenti utili per riflettere: il costo marginale di abbattimento necessario per portare il Pianeta all'obiettivo di stabilizzazione; altri fattori che possono influenzare la disponibilità di un Paese a pagare per la riduzione delle emissioni di carbonio. Così, mentre l'SCC dipende esclusivamente dalla nostra comprensione del danno causato e dal modo in cui lo valutiamo, l'SPC può adattarsi per riflettere il contesto politico e tecnologico di riferimento. Questo rende l'SPC più versatile per garantire che le decisioni politiche siano compatibili con gli obiettivi e gli impegni del Governo in materia di cambiamenti climatici.

### 3.1 Costo Sociale del Carbonio

Per la stima dell'SCC, l'*United States Government Inter-agency Working Group on social cost of carbon*, si basa sui modelli: *Dynamic Integrated Climate-Economy* (DICE); *Policy Analysis of the Greenhouse Effect* (PAGE) (Hope, 2008); *Climate Framework for Uncertainty, Negotiation, and Distribution* (FUND) (Anthoff e Tol, 2013). Si tratta di modelli di valutazione integrata (*Integrated Assessment Models*, IAM) ormai fondamentali per stimare costi e benefici delle politiche di riduzione delle emissioni di gas serra. Gli IAM permettono di prevedere la relazione tra azioni di politica energetica e danni indotti dal cambiamento climatico (Moore et al., 2018).

Per la sua versatilità e per la possibilità di essere integrato

con altri approcci, il modello *Dynamic Integrated Climate-Economy* (DICE) è solitamente preferito ad altri modelli di stima. Il DICE permette di massimizzare l'utilità sociale trovando un livello ottimale di abbattimento delle emissioni di carbonio e, in corrispondenza di tale livello, il Costo Marginale di Abbattimento Socialmente Ottimale (*Social Marginal Abatement Cost*, SMAC), che rappresenta l'output diretto. Sia lo SMAC che l'SCC sono espressi in dollari USA per tonnellata di CO<sub>2</sub> e rappresentano il costo del carbonio associato, rispettivamente, all'abbattimento o all'emissione di una tonnellata di CO<sub>2</sub>. Pertanto, lo SMAC è il risultato diretto del problema di ottimizzazione del benessere sociale secondo il modello DICE. L'SCC, invece, è una combinazione di due prodotti indiretti del modello, ovvero rappresenta un "tasso di scambio" tra emissioni aggiuntive e consumi aggiuntivi in grado di mantenere costante l'utilità sociale (Khabarov et al., 2022).

Tra gli IAM, il modello PAGE è stato ampiamente investigato. PAGE09 – ultima iterazione del PAGE – è un modello a otto regioni che prende come input reddito, popolazione ed emissioni di quattro diversi gas serra (anidride carbonica, metano, protossido di azoto e un insieme di altri gas serra). Utilizza un modello climatico di equilibrio radiativo per simulare i cambiamenti di temperatura e l'innalzamento del livello del mare a scala sia globale che regionale (Moore et al., 2018).

FUND è un ulteriore IAM che impiega proiezioni di: popolazioni; attività economiche ed emissioni; ciclo del carbonio e risposte dei modelli climatici; impatti dei cambiamenti climatici sul benessere (Link e Tol, 2011). Tali impatti riguardano prevalentemente: agricoltura, silvicoltura, innalzamento del livello del mare, disturbi cardiovascolari e respiratori, malattie ed epidemie, consumo di energia, risorse idriche, ecosistemi non gestiti e impatti di tempeste tropicali ed extratropicali (Anthoff e Tol, 2013).

Tra gli studi più recenti, Rennert et al. (2022) stimano l'SCC implementando il *Greenhouse Gas Impact Value Estimator* (GIVE), un modello di valutazione integrata che permette di quantificare i benefici della riduzione delle emissioni. Il modello è costruito su una piattaforma open-source (Mimi.jl). GIVE incorpora i recenti progressi scientifici che non sono stati presi in considerazione dalla precedente generazione di IAM. In particolare, GIVE quantifica le incertezze in ogni componente e propaga queste incertezze, consentendo così una valutazione che tiene conto del rischio associato ad un'emissione marginale di CO<sub>2</sub>. GIVE impiega una serie di proiezioni probabilistiche riguardanti la popolazione, la crescita economica pro capite, le emissioni di CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

In sintesi, la stima dell'SCC tramite IAM richiede: la conoscenza dell'effetto delle emissioni sulle variabili climatiche future; la stima dei danni globali che tali variabili climatiche porteranno negli anni a venire; la scelta di un tasso di sconto per attualizzare i danni futuri al presente

## Servizi ecosistemici forestali: valutazione economica del sequestro di anidride carbonica su area vasta

(Maselli e Nesticò, 2020; Nesticò e Maselli, 2020; Stern e Stiglitz, 2021; Tol, 2019).

### 3.2 Prezzo Ombra del Carbonio

Una seconda metodologia, ampiamente impiegata per valutare in termini economici il valore della CO<sub>2</sub>, consiste nella stima del suo prezzo ombra. In letteratura quest'ultimo può avere valori anche marcatamente differenti in funzione della procedura di stima. Secondo l'approccio *Directional Distance Function* (DDF), il prezzo ombra esprime il costo opportunità necessario per ridurre gli output indesiderabili (gli inquinanti) nei processi di produzione.

La DDF è una forma generale della *Distance Function* (DF) di rendimento proposta per la prima volta da Shephard ed è una rappresentazione generalizzata del modello radiale di analisi di involuppo dei dati. La DDF consente di osservare simultaneamente la direzione del cambiamento dell'output desiderabile e dell'output in-

desiderabile e garantisce il massimo dell'efficienza solo quando l'output desiderabile raggiunge il massimo e l'output indesiderabile il minimo (Wu e Lin, 2019). Per la risoluzione del modello della DDF si può ricorrere sia a metodi parametrici che a metodi non parametrici.

Una DDF ampiamente sperimentata è la *Directional Environmental Production Frontier Function* (DEPFF). Tale funzione misura la distanza tra i punti di produzione effettivi e la superficie della frontiera di produzione effettiva, così da fornire i prezzi ombra delle emissioni di CO<sub>2</sub>.

Di recente, la DDF ha trovato un diffuso utilizzo poiché impiega prezzi degli input e degli output generalmente disponibili e di agevole reperimento (Wang et al., 2016). Per contro, i risultati possono sensibilmente variare a seconda della scelta del metodo (parametrico e non-parametrico), del campione dei dati e dell'intervallo temporale in cui i dati stessi ricadono.

L'analisi della letteratura è condotta secondo l'ordine dei diversi modelli adottati e trova sintesi nella Tabella 1.

**Tabella 1** - Letteratura di riferimento per la stima del valore della CO<sub>2</sub>

Studio	Anno	Metodologia	Modello	Livello di analisi	Valore [t/CO <sub>2</sub> ]
US Environmental Protection Agency (EPA, 2016)	2030 2050	Costo Sociale	IAMs <sup>a</sup>	USA	16-152 \$ 26-212 \$
Dietz e Stern (2015)	2015 2035	Costo Sociale	IAM <sup>b</sup>	Globale	32-103 \$ 82-260 \$
Kalkuhl e Wenz (2020)	2020 2030	Costo Sociale	IAM	77 Paesi	73-142 \$ 92-181 \$
Rennert et al. (2022)	2020	Costo Sociale	IAM <sup>c</sup>	USA	44-413 \$
Pindyck (2019)	2019	Costo Sociale	Sondaggi tra esperti del settore	Globale	80-300 \$
Qi et al. (2004)	1980- 2000	Prezzo ombra	DF <sup>d</sup>	44 Paesi	308,5 \$
Salnykov e Zelenyuk (2005)	1995- 2000	Prezzo ombra	DF	96 Paesi	133-478 \$
Dang e Mourougane (2014)	1990- 2008	Prezzo ombra	DF	19 Paesi	240-786 \$
Marklund e Samakovlis (2007)	1990- 2000	Prezzo ombra	DDF <sup>e</sup>	15 Paesi EU	670
Wang et al. (2011)	2007	Prezzo ombra	DDF	Cina	71,3 \$
Du et al. (2012)	2001-2010	Prezzo ombra	DDF	Cina	157,03 \$
Wei et al. (2013)	2004	Prezzo ombra	DDF	Cina	248,9 \$
Wu e Lin (2019)	2006-2015	Prezzo ombra	DEPFF <sup>f</sup>	Cina	157,14 \$

<sup>a</sup> Integrated Assessment Models (DICE, PAGE, FUND)

<sup>b</sup> Dynamic integrated climate-economy model (DICE)

<sup>c</sup> Greenhouse Gas Impact Value Estimator open-source model (GIVE)

<sup>d</sup> Distance function (DF)

<sup>e</sup> Directional distance function (DDF)

<sup>f</sup> Directional Environmental Production Frontier Function (DEPFF)

### 3.3 Prezzo di mercato del Carbonio

In aggiunta agli approcci (i) e (ii), un'approssimazione del valore del servizio ecosistemico di sequestro di CO<sub>2</sub> può essere definita dal prezzo dell'anidride carbonica (approccio iii) stabilito nei cosiddetti Mercati di carbonio regolamentati o volontari.

Il Mercato dei permessi di emissione (*Emission Trade*), regolato dallo *European Union Emissions Trading Scheme* e introdotto in Europa nel 2005 dal Protocollo di Kyoto, è il più grande mercato al mondo per lo scambio delle quote di emissione di CO<sub>2</sub>. Tale mercato prevede lo scambio di quote di emissione tra aziende e governi con l'obiettivo di trarre profitto dalle quote non utilizzate (pari a CO<sub>2</sub> non emessa) o di raggiungere obiettivi normativi. Infatti, per ogni tonnellata di CO<sub>2</sub> emessa dalle aziende, oltre quelle concesse, lo schema impone l'acquisto di un certo numero di certificati il cui prezzo è determinato sul mercato in base alla domanda e all'offerta, quest'ultima regolata dalla Commissione europea. Il prezzo di equilibrio nel mercato dei permessi, definito come credito di carbonio, è dunque equiparabile al costo marginale di abbattimento di una tonnellata di CO<sub>2</sub>. Tale prezzo, rispetto al valore iniziale nel 2005 di circa 20 €/ton di CO<sub>2</sub>, nel quadriennio 2018-2022 è cresciuto molto arrivando ad una quota di circa 80 €/ton.

Il *Voluntary Carbon Market*, invece, è un mercato emerso parallelamente all'attuazione del Protocollo di Kyoto per quei settori non inglobati dal mercato regolamentato. Trattasi, dunque, di una realtà economica fondamentale per aziende, imprese ed enti, pubblici o privati, che vogliono fornire un reale contributo per la lotta al cambiamento climatico e agli obiettivi di sviluppo sostenibile.

Puntando alla cosiddetta *Carbon Neutrality*, i principali attori del mercato, attraverso la costante ricerca di soluzioni innovative, mirano ad azzerare il loro impatto ambientale riducendo le proprie emissioni. Le aziende o gli enti, per cui risulta fisicamente e/o finanziariamente impossibile raggiungere determinati target di emissioni prefissati, procedono alla compensazione (*Carbon Offsetting*): quest'ultima è un meccanismo che permette di compensare le proprie emissioni di CO<sub>2</sub> tramite il supporto a progetti certificati di riduzione delle emissioni. Tale meccanismo si realizza attraverso l'acquisto di crediti di carbonio, dove un credito corrisponde ad una tonnellata di CO<sub>2</sub> assorbita o evitata dal progetto.

Secondo quanto riportato dall'ente certificatore Gold Standard, il prezzo minimo del credito di carbonio nel mercato volontario attualmente varia da 8,20 €/tCO<sub>2</sub>, per progetti di efficienza energetica, a 13 €/tCO<sub>2</sub> per progetti forestali.

Ad oggi, sono sempre più numerose le agenzie specializzate di intermediazione (*Carbon Broker*) nate nel mondo: queste ultime offrono assistenza agli investitori sia per la riduzione delle emissioni interne che per l'individuazione dei migliori partner per l'acquisizione dei

crediti di carbonio finalizzati all'azzeramento delle proprie emissioni.

Il ricorso al prezzo stabilito nei mercati di carbonio costituisce un metodo di valutazione monetaria della CO<sub>2</sub> che presenta evidenti vantaggi in termini di rapidità di stima, dimostrandosi principalmente adatto ad una valutazione speditiva su vasta scala. Al tempo stesso, però, esso sconta la mancata considerazione della componente sociale e l'estrema variabilità del prezzo di riferimento, sia sul medio che sul breve termine (Ingaramo et al., 2017).

## 4. METODOLOGIA DI ANALISI

Scopo del lavoro è la mappatura e la valutazione economica della funzione di sequestro della CO<sub>2</sub> da parte del patrimonio forestale su area vasta. A tal fine si definisce una metodologia basata su quattro fasi sintetizzate in Figura 1.

Tutte le informazioni, i dati e i valori di stima riguardanti le fasi del modello sono rappresentati su Geographic Information System (GIS).

Di seguito si dettagliano le fasi del quadro metodologico.

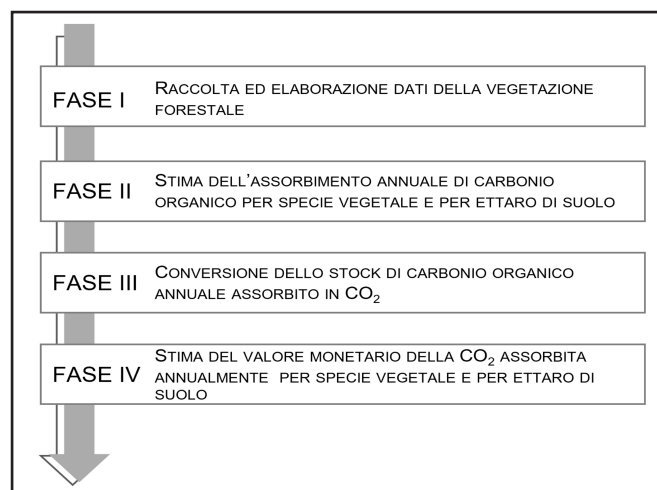


Figura 1 - Schema del quadro metodologico proposto (Fonte: nostra elaborazione).

### Fase I - Raccolta ed elaborazione dati sulle categorie forestali dell'area oggetto di analisi

Con riferimento all'area vasta oggetto di studio, la prima fase prevede la raccolta di informazioni sul patrimonio forestale e sulle corrispondenti categorie forestali: categorie definite dalla prevalenza di una sola specie arborea oppure dalla compresenza di due o più specie arboree.

A tale scopo, in Italia validi riferimenti sono la Carta Forestale Regionale e la Carta della Natura. Quest'ultima, in particolare, necessita di un'elaborazione ulteriore dei dati per raggruppare in categorie forestali gli habitat in cui è classificata.

## Servizi ecosistemici forestali: valutazione economica del sequestro di anidride carbonica su area vasta

Le informazioni territoriali raccolte necessitano poi di attività di georeferenziazione.

### Fase II - Stima della rimozione e dell'immagazzinamento annuale di carbonio organico per categoria forestale e per ettaro di suolo

Secondo quanto esposto alla Sezione 2, per contabilizzare la rimozione e l'immagazzinamento annuale di carbonio organico, per ciascuna categoria forestale e per ettaro di suolo, occorre considerare l'accrescimento annuale dei cinque tipi di *carbon pools* indicati dall'IPPC (2020): biomassa epigea, biomassa ipogea, necromassa, lettiera e suolo.

Nel dettaglio, l'IPPC definisce l'incremento annuale  $C$  dello stock di carbonio organico dovuto all'espansione nei terreni forestali di biomassa, epigea ed ipogea:

$$\Delta C_{FFG} = \sum_{ij} (A_{ij} \cdot G_{TOTij}) \cdot CF \quad (1)$$

Dove:

- $\Delta C_{FFG}$  (tC/anno) rappresenta l'aumento annuo degli stock di carbonio dovuto all'incremento della biomassa epigea e della biomassa ipogea per tipo di foresta e zona climatica;
- $A_{ij}$  (ha) indica la superficie forestale per tipo (i) e per zona climatica (j);
- $G_{TOTij}$  (td.m. ha<sup>-1</sup> anno<sup>-1</sup>) è l'incremento medio annuo della biomassa totale in unità di sostanza secca, per tipo di foresta (i) e zona climatica (j);
- $CF$  (tC) rappresenta la frazione di carbonio pari al 50% del peso secco.

A sua volta, l'incremento medio annuo  $G_{TOT}$  della biomassa è indicato dall'IPPC come:

$$G_{TOT} = G_W \cdot (1+R) \quad (2)$$

$$G_W = I_V \cdot D \cdot BEF \quad (3)$$

In cui:

- $G_W$  (td.m. ha<sup>-1</sup> anno<sup>-1</sup>) è l'incremento medio annuo della biomassa epigea;
- $R$  indica il rapporto adimensionale *root/shoot* che converte, per tipo forestale, la biomassa epigea in biomassa ipogea;
- $I_V$  (m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> anno<sup>-1</sup>) rappresenta l'incremento medio annuo netto in volume;
- $D$  (td.m./m<sup>3</sup>) è la densità di base del legno;
- $BEF$  indica il *Biomass Expansion Factor*, ovvero il fattore adimensionale per la conversione del volume in biomassa arborea epigea.

Con riferimento all'IPPC e alla metodologia proposta da Federici et al. (2008), si definisce l'incremento annuale  $\Delta C$

dello stock a seguito dell'espansione annuale di necromassa come:

$$\Delta C_{FFG} = \sum_{ij} (A_{ij} \cdot G_{Dij}) \cdot CF \quad (4)$$

In cui, l'incremento medio annuo  $G_D$  della necromassa è:

$$G_D = G_W \cdot DCF \quad (5)$$

Dove:

- $G_W$  (td.m. ha<sup>-1</sup> anno<sup>-1</sup>) è l'incremento medio annuo della biomassa epigea;
- $DCF$  indica il *Dead mass Conversion Factor* che converte la biomassa ipogea in necromassa.

Infine, con riguardo al suolo e alla lettiera, è possibile stimare, tramite relazioni lineari differenziate per uso forestale, l'incremento annuale dello stock di  $C$  a partire dalla stessa quantità stimata per la biomassa epigea (Federici et al., 2008).

In Italia, per la Fase II della metodologia di studio, valido riferimento è fornito dall'INFC che stima il quantitativo di carbonio organico rimosso ed immagazzinato annualmente per accrescimento della componente epigea.

### Fase III - Conversione in CO<sub>2</sub> dello stock di carbonio organico annuale rimosso ed immagazzinato

Per convertire in CO<sub>2</sub> il quantitativo di carbonio organico annuale rimosso ed immagazzinato da ciascuna categoria forestale e, dunque, per ettaro di suolo, si procede analiticamente secondo la relazione:

$$tCO_2 = 3,67 \cdot tC \quad (6)$$

Dove il quantitativo di anidride carbonica (tCO<sub>2</sub>) si ottiene moltiplicando il carbonio organico (tC) per il rapporto tra i pesi molecolari dell'anidride carbonica e del carbonio elementare (44/12=3,67).

### Fase IV - Stima del valore monetario della CO<sub>2</sub> assorbita annualmente per categoria forestale e per ettaro di suolo.

Tale stima va ricondotta ad uno dei procedimenti descritti nella Sezione 3, scelto in base all'obiettivo della ricerca e tenendo conto dei limiti e dei vantaggi di ciascun approccio. Il valore monetario ottenuto, moltiplicato per lo stock di CO<sub>2</sub> (t ha<sup>-1</sup> anno<sup>-1</sup>), restituisce la distribuzione spaziale dei valori monetari relativi al flusso annuo medio di anidride carbonica fissata dall'ecosistema forestale.

La metodologia descritta intende, dunque, mappare e valutare economicamente il servizio di sequestro di carbonio su area vasta. Novità dell'approccio riguardano: (i) il ricorso alle categorie forestali per la determinazione delle quantità di CO<sub>2</sub> assorbita; (ii) l'automatizzazione delle elaborazioni senza ricorso a software esterni. Si tratta di aspetti che differenziano il presente lavoro da studi di letteratura che si pongono lo stesso obiettivo. Il rimando è all'analisi svolta per la Regione Sardegna da Ingarano et al. (2017) i quali, utilizzando la Carta dell'Uso del Suolo, valutano e mappano la funzione di sequestro di carbonio analizzando, con un minor livello di dettaglio, le seguenti categorie forestali: latifoglie, sugherete, castagneti, arboricoltura di latifoglie, conifere, arboricoltura di conifere, misto.

Ancora, per la Regione Molise Sallustio et al. (2015) applicano il software *InVEST Carbon Storage*, così come Pilogallo e Scorza (2021) per la Regione Basilicata. Tale software gratuito, sviluppato da *Natural Capital Project*, calcola il servizio di stoccaggio e sequestro di carbonio. Gli input di informazioni necessari per l'esecuzione sono la Carta dell'Uso del Suolo, in formato raster, ed una tabella con i dati inerenti, per ogni pixel della Carta, al quantitativo di carbonio assorbito da: biomassa epigea, biomassa ipogea, lettiera e suolo della vegetazione presente. Un limite per l'applicazione di *InVEST* è senz'altro la necessità di una conoscenza dei software GIS.

Ampiamente utilizzato è il tool *i-Tree Eco* della suite di software gratuita *i-Tree*, seppure orientato ad elaborazioni su aree meno estese, rispetto a quelle indagate con questa ricerca, e principalmente per scopi di pianificazione urbanistica. Qui la richiesta di dati di input molto dettagliati (specie forestale, diametro del fusto, altezza dell'albero dal piano di campagna ecc.) può rappresentare un limite all'analisi su area vasta.

## 5. CASO STUDIO: MAPPATURA E VALUTAZIONE ECONOMICA DELLA FUNZIONE DI SEQUESTRO DELLA CO<sub>2</sub> IN REGIONE CAMPANIA (ITALIA)

Il servizio ecosistemico di sequestro di CO<sub>2</sub> è stato mappato e valutato economicamente con riferimento al territorio della Regione Campania, in Italia. L'ecosistema forestale oggetto di studio ricopre circa il 30% della superficie regionale, con un'estensione pari circa a 440.000 ha.

### Fase I

Con riferimento alla Fase I del quadro metodologico, sono stati raccolti ed elaborati, con l'uso del software QGIS, i dati della Carta della Natura della Regione Campania, fornita dall'ISPRA in scala 1:50.000 e 1:25.000 (Bagnaia et al. 2017).

Nello specifico, tra gli habitat riportati all'interno della

Carta della Natura, si è fatto riferimento agli habitat "Foreste e Boschi" e alle relative informazioni riguardanti l'estensione in ettari.

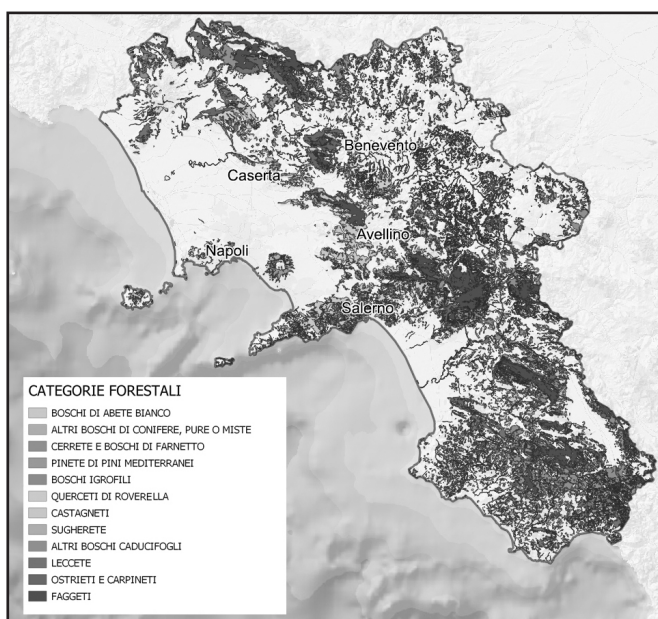
In seguito, grazie alla Guida alla classificazione della vegetazione forestale (INFC, 2003), tali habitat sono stati raggruppati nelle categorie forestali adottate dall'Inventario Forestale Nazionale. Ciò ha permesso una rappresentazione di più chiara lettura ed una coerenza con la terminologia adottata dall'Inventario Forestale Nazionale utilizzato come riferimento per la Fase II.

La Figura 2 rappresenta l'elaborazione dei dati riguardanti la vegetazione forestale dell'area oggetto di analisi. Nel dettaglio, emerge come in prossimità e nelle aree delle principali città della Campania, quali Napoli, Caserta, Salerno, Avellino, Benevento, ci sia una carenza di copertura vegetale. La stessa si manifesta in modo accentuato anche ad Est della Regione, a confine con la Basilicata, dove si localizzano i Comuni di Sala Consilina e Teggiano. Viceversa, la ricchezza di specie forestali emerge principalmente nelle Aree protette della Regione e nelle aree dei Parchi regionali e nazionali: Parco regionale Roccamonfina – Foce Garigliano, Parco regionale del Matese, Parco regionale Taburno Camposauro, Parco regionale del Partenio, Parco regionale Monti Picentini, Parco nazionale del Cilento, Vallo di Diano e Alburni. Ciò che inoltre emerge è la grande ricchezza, in termini forestali e, dunque, in termini di servizi ecosistemici, delle aree a lungo definite "marginali": in questi territori, infatti, è custodita gran parte delle risorse naturali del nostro Paese. Non a caso, è in questi piccoli comuni

**Tabella 2 - Estensione delle categorie forestali della Regione Campania**

Categoria forestale	Area [ha]	Area [% sul totale della superficie boscata]
Boschi di abete bianco	90,33	0,02
Altri boschi di conifere, pure o miste	2.261,65	0,59
Cerrete e boschi di farnetto	102.894,00	26,86
Pinete di pini mediterranei	2.448,70	0,64
Boschi igrofilii	12.147,60	3,17
Querceti di roverella	59.623,70	15,57
Castagneti	51.100,60	13,34
Sugherete	727,05	0,19
Altri boschi caducifogli	11.917,30	3,11
Leccete	35.902,40	9,37
Ostietri e carpineti	38.651,20	10,09
Faggeti	65.226,00	17,03

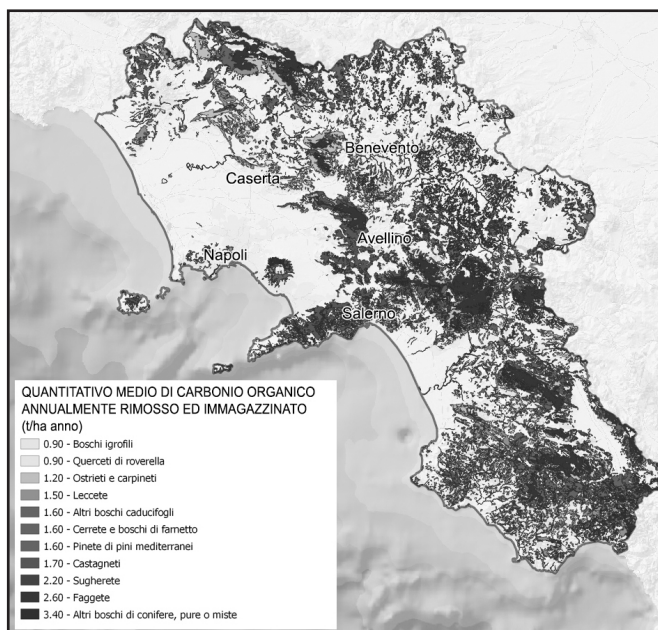
## Servizi ecosistemici forestali: valutazione economica del sequestro di anidride carbonica su area vasta



**Figura 2** - Rappresentazione cartografica delle categorie forestali della Regione Campania. (Fonte: nostra elaborazione con il software QGIS).

che si sono registrati i primi esempi significativi delle pratiche di economia circolare grazie allo stretto rapporto con la natura e la cultura locale.

La Tabella 2, invece, riporta l'estensione delle categorie forestali viste in Figura 2, sia in ettari che in percentuale sul totale della superficie boscata.



**Figura 3** - Rappresentazione cartografica della quantità media di carbonio organico medio annualmente rimosso ed immagazzinato per categoria forestale (Fonte: nostra elaborazione con il software QGIS).

### Fase II

Per la stima della rimozione e dell'immagazzinamento annuale di carbonio organico, per categoria forestale ed ettaro di suolo, è stato fatto riferimento all'Inventario Forestale Nazionale (2005). Questo ultimo, come anticipato nella Sezione 4, stima il quantitativo di carbonio organico medio che un ettaro di superficie rimuove annualmente dall'atmosfera immagazzinandolo nei tessuti vegetali di nuova formazione. In assenza di dati riguardanti l'espansione volumetrica delle radici e del carbonio stoccato nel suolo e nella lettiera, il processo di sequestro è stimato solo per la componente epigea delle foreste.

I risultati trovano sintesi in Figura 3.

### Fase III

Successivamente, come previsto dalla Fase III, tramite l'Equazione 6 alla Sezione 4 ( $T_{CO_2} = 3,67 T_c$ ), è stata stimata la quantità media di anidride carbonica assorbita annualmente per ettaro di suolo e per categoria forestale. I risultati ottenuti sono rappresentati in Figura 4.

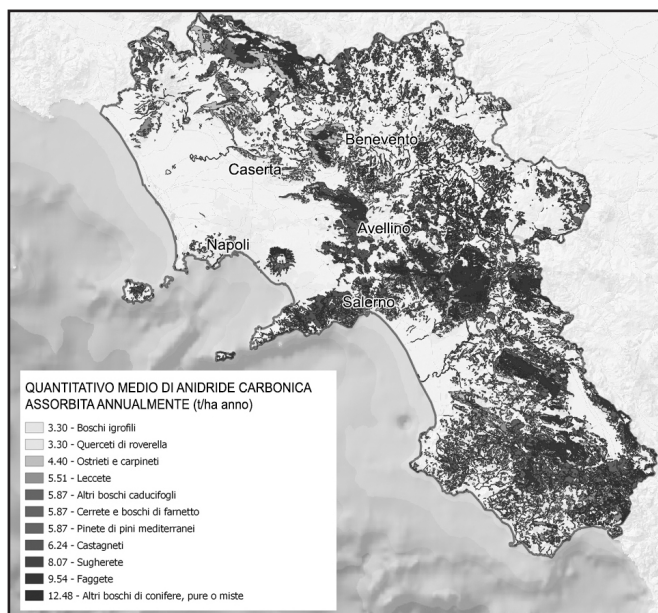
Coerentemente con quanto emerso dalla Figura 2, le Figure 3 e 4 mostrano una quantità annua rimossa ed immagazzinata di carbonio organico e, dunque, una quantità assorbita di anidride carbonica, maggiore nelle zone in prossimità delle Aree protette e dei Parchi già citati. Inoltre, le rappresentazioni spaziali confermano una maggiore salubrità dell'aria ed un elevato livello di benessere ambientale nelle aree interne; ciò contrariamente alle grandi aree urbanizzate altamente inquinate.

### Fase IV

L'ultima fase del quadro metodologico ha riguardato la stima del valore monetario del servizio ecosistemico oggetto di studio fornito dal patrimonio forestale della Regione Campania. Per quanto attiene ai procedimenti di stima descritti nella Sezione 3, la valutazione economica del servizio ecosistemico si è avvalsa del prezzo di mercato dei permessi di emissione, così come regolato dall'*European Union Emissions Trading Scheme*. Attualmente, nel più recente Rapporto sulle aste di quote europee di emissione (2022), il prezzo medio della  $CO_2$  riportato è di 82 euro/ton, nettamente più elevato rispetto al prezzo medio di 39 euro/ton del 2021.

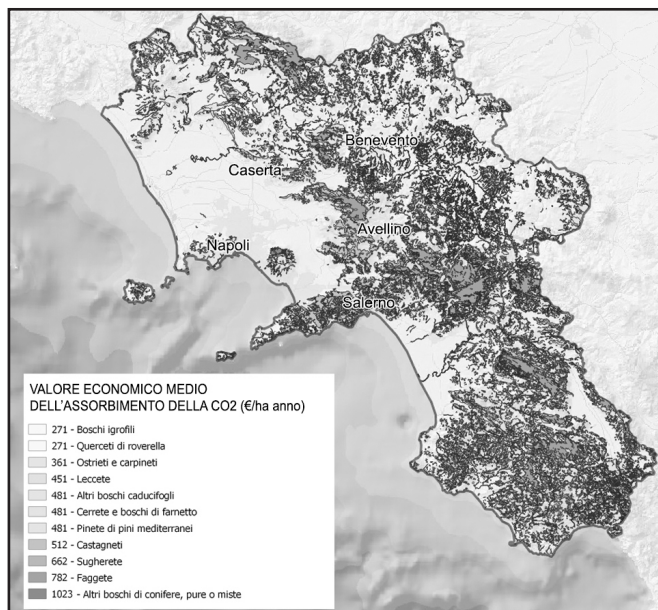
Come anticipato nella Sezione 3, la scelta del riferimento al mercato delle emissioni presenta evidenti vantaggi in termini di rapidità di stima, adattandosi alla presente valutazione speditiva su scala regionale.

Il prezzo medio della  $CO_2$  è stato infine moltiplicato per lo stock di  $CO_2$  ( $t\ ha^{-1}\ anno^{-1}$ ) stimato nella fase precedente: ciò ha restituito la distribuzione spaziale dei valori monetari relativi al flusso annuo medio di  $CO_2$  fissato dall'ecosistema forestale campano (Fig. 5).



**Figura 4 -** Rappresentazione cartografica della quantità media di anidride carbonica assorbita annualmente per categoria forestale. (Fonte: nostra elaborazione con il software QGIS).

L'implementazione della metodologia restituisce per la Regione Campania un'estensione del patrimonio forestale pari a circa 370.000 ettari, il quale assorbe annualmente un quantitativo di 2.172.800 tonnellate di CO<sub>2</sub>, per un corrispettivo economico di 178.172.560 euro prendendo a riferimento il mercato regolamentato.



**Figura 5 -** Rappresentazione cartografica del valore economico medio, per categoria forestale, dell'assorbimento annuale medio di CO<sub>2</sub> (Fonte: nostra elaborazione con il software QGIS).

## 6. DISCUSSIONI

I risultati ottenuti dall'applicazione metodologica confermano l'importanza dei servizi ecosistemici quale fonte di benefici ambientali ed economici.

Analizzando i capoluoghi campani: Avellino mostra i dati più alti di assorbimento, pari annualmente a circa 43.500 tCO<sub>2</sub> per un valore economico di 3.567.000 euro; Salerno assorbe annualmente 14.850 tCO<sub>2</sub> pari a 1.217.700 euro; a seguire Benevento ha un assorbimento annuale di 14.100 tCO<sub>2</sub>, corrispondente a 1.156.200 euro; Caserta assorbe 6.000 tCO<sub>2</sub> all'anno, per 492.000 euro; per ultima Napoli, con i valori più bassi, ha un assorbimento di 3.620 tCO<sub>2</sub>/anno pari a 296.840 euro.

È interessante il confronto con i dati delle aree interne: il Cilento Interno registra i dati più alti assorbendo annualmente 348.800 tCO<sub>2</sub> per un valore di 28.601.600 euro; l'Alta Irpinia assorbe annualmente 320.780 tCO<sub>2</sub> pari a 26.303.960 euro; a seguire il Vallo di Diano assorbe 317.370 tCO<sub>2</sub> all'anno per 26.024.340 euro; ultima l'area di Tammaro-Titerno con un assorbimento di 252.560 tCO<sub>2</sub>/anno dal valore di 20.709.920 euro.

I dati mostrano una grande ricchezza di categorie forestali nelle aree marginali in cui, di conseguenza, si conferma una maggiore salubrità dell'aria e un elevato livello di benessere ambientale.

Riconoscere e stimare il valore economico del servizio ecosistemico significa, dunque, poter porre anche le basi per implementare programmi di sviluppo sostenibile per le aree interne: il valore economico del servizio ecosistemico è una potenziale fonte di risorse economiche da mettere in campo per i programmi di riqualificazione degli ecosistemi e delle aree interne che li tutelano.

Queste ultime sono da tempo colpite da un grave fenomeno di spopolamento legato principalmente all'assenza o inadeguatezza di infrastrutture e servizi essenziali.

A tal proposito, l'approccio di governance dei *Payments for Ecosystem Services* (PES) rappresenterebbe ottimo strumento di politica economica improntato a riconoscere, attraverso l'attivazione di flussi finanziari, il ruolo prezioso delle aree interne quali fonti principali di fornitura di servizi ecosistemici a beneficio dell'intero Paese. Ciò consentirebbe anche di ristabilire un equilibrio economico tra le popolazioni impegnate nella tutela e nella conservazione dell'ecosistema e quelle che, di contro, continuano a sfruttare in maniera insostenibile le risorse naturali (Wunder, 2008).

## 7. CONCLUSIONI

Il ruolo dei servizi ecosistemici costituisce argomento di studio interdisciplinare che ha assunto, specialmente negli ultimi anni, una centralità nei dibattiti riguardanti l'ambiente, l'emergenza climatica e le strategie di sviluppo sostenibile.



## Servizi ecosistemici forestali: valutazione economica del sequestro di anidride carbonica su area vasta

Il capitale naturale, in grado di fornire benessere al genere umano, è sottoposto a continuo sfruttamento da parte dell'uomo comportando una significativa trasformazione degli ecosistemi e una conseguente perdita di biodiversità in tutto il Pianeta.

Con l'obiettivo di tutelare il nostro territorio e agire su di esso in modo più sostenibile, un approccio di governance emerso negli ultimi anni è quello dei *Payments for Ecosystem Services*, la cui applicazione necessita di una stima, in termini monetari, dei servizi offerti da ogni ecosistema.

In linea con quanto espresso, il presente lavoro ha l'obiettivo di caratterizzare una metodologia per la mappatura e la valutazione economica di uno dei principali servizi ecosistemici: il sequestro di anidride carbonica da parte del patrimonio forestale su area vasta.

Il quadro metodologico è articolato in quattro fasi: la raccolta e l'elaborazione dei dati delle categorie forestali dell'area oggetto d'analisi; la stima della rimozione e dell'immagazzinamento annuale di carbonio organico per categoria forestale ed ettaro di suolo; la conversione in CO<sub>2</sub> dello stock di carbonio organico annualmente rimosso ed immagazzinato; la stima del valore monetario della CO<sub>2</sub> assorbita annualmente per categoria forestale ed ettaro di suolo.

L'applicazione della metodologia ha riguardato la Regione Campania il cui patrimonio forestale, esteso 370.000 ettari, assorbe annualmente 2.172.800 tonnellate

di CO<sub>2</sub>, per un corrispettivo economico di 178.172.560 euro secondo i valori del mercato regolamentato.

Diversamente da quanto in letteratura, la valutazione e la mappatura su area vasta è qui svolta ad un maggior livello di dettaglio e senza ricorso a software esterni. Infatti, a differenza degli approcci che connotano software già disponibili, come *InVEST* o *i-Tree Eco*, il quadro metodologico è qui sviluppato per la prima volta prendendo a riferimento le categorie forestali, con lo scopo di tracciare un modello operativo volto ad una rapida misura della CO<sub>2</sub>, assorbita in un determinato ambito territoriale, e alla stima del corrispondente valore monetario.

In prospettiva di ricerca, s'intende caratterizzare un nuovo software basato sugli algoritmi di stima della metodologia definita. Trattasi precisamente di un software *user-friendly* che, diversamente dagli applicativi già disponibili, richiede quale unico input la perimetrazione su mappa dell'area d'indagine ed è in grado di restituire immediatamente la misurazione del quantitativo di CO<sub>2</sub> annualmente assorbito dal patrimonio forestale e la previsione del relativo valore economico. Il fine ultimo è di rendere lo strumento di semplice fruizione da parte di pubbliche amministrazioni, associazioni locali e anche cittadini favorendo, per conseguenza, un aumento della consapevolezza del ruolo cruciale dei servizi ecosistemici in materia di cambiamenti climatici.

### Ringraziamenti

L'articolo è il risultato di attività di ricerca condotta con finanziamento del Consorzio inter-Universitario per la previsione e la prevenzione dei Grandi Rischi (C.U.G.RI.), istituito dai Rettori dell'Università degli Studi di Salerno e dell'Università degli Studi di Napoli "Federico II".

\* **Federica Russo**, Università degli Studi di Salerno, Dipartimento di Ingegneria Civile  
e-mail: frusso@unisa.it

\*\* **Gabriella Maselli**, Università degli Studi di Salerno, Dipartimento di Ingegneria Civile  
e-mail: gmaselli@unisa.it

\*\*\* **Antonio Nesticò**, Università degli Studi di Salerno, Dipartimento di Ingegneria Civile  
e-mail: anesticò@unisa.it

### Contributi degli autori

Il presente lavoro è da attribuire in parti uguali ai tre autori.

### Bibliografia

ANTHOFF D., TOL R.S.J., *The uncertainty about the social cost of carbon: A decomposition analysis using FUND*,

Climate Change 117, 2013, pp. 515–530. doi:10.1007/s10584-013-0706-7

BAGNAIA R., VIGLIETTI S., LAURETI L., GIACANELLI V., CERALLI D.,

BIANCO P.M., LORETO A., LUCE E., FUSCO L., Carta della Natura della Regione Campania: Carta degli habitat alla scala 1:25.000, ISPRA, 2017.

BARDE J.P., PEARCE D., *Valutare l'ambiente. Costi e benefici nella politica ambientale*, Il Mulino, Bologna, 1993.

CANADELL J.G., LE QUERE C., RAUPACH M.R., FIELD C.B., BUITENHUIS E.T., *Contributions to accelerating atmospheric CO<sub>2</sub> growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks*, Proceedings of the National Academy of Sciences, Vol. 104, No. 47, 2007, pp. 18866-18870.

CESARO L., ROMANO R., MARONGIU S., *RAF Italia - 2017-2018. Rapporto sullo stato delle foreste e del settore forestale in Italia*, Compagnia delle Foreste S.r.l, 2019.

CLARK K.L., GHOLZ H.L., CASTRO M., *Carbon dynamics along a chronosequence of slash pine plantations in North Florida*, Ecological Applications, Vol. 14, No. 4, 2004, pp. 1154-1171.

COSTANZA R., D'ARGE R., DE GROOT R., FARBER S., GRASSO M., HANNON B., LIMBURG K., NAEEM S., O'NEILL R.V., PARUELO J., RASKIN R.G., SUTTON P., VAN DEN BELT M., *The value of the world's ecosystem services and natural capital*, Nature, Vol. 387, 1997, pp. 253-260.

COSTANZA R., DE GROOT R., SUTTON P., VAN DER PLOEG S., ANDERSON S. J., KUBISZEWSKI I., TURNER R. K. *Changes in the global value of ecosystem services*. *Global Environmental Change*, Vol. 26, No. 1, 2014, pp. 152-158. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2014.04.002

DANG T., MOUROUGANE A., *Estimating shadow prices of pollution in Selected OECD Countries*, OECD Green Growth Papers, No. 2014/02, OECD Publishing, 2014.

DI COSMO L., TOSI V., PALETTO A., FLORIS A., "I caratteri quantitativi – La terza fase", in Gasparini P., Tabacchi G., (eds.), *L'Inventario Nazionale delle Foreste e dei serbatoi forestali di Carbonio INFC 2005. Secondo inventario forestale nazionale italiano. Metodi e risultati*, Ministero delle Politiche Agricole, Alimentari e Forestali; Corpo Forestale dello Stato. Consiglio per la Ricerca e la Sperimentazione in Agricoltura, Unità di ricerca per il Monitoraggio e la Pianificazione Forestale. Edagricole, Milano, 2011, pp. 54-59.

DIETZ S., STERN N., *Endogenous Growth, Convexity of Damage and Climate Risk, How Nordhaus' Framework Supports Deep Cuts in Carbon Emissions*, The Economic Journal, Vol. 125, 2015, pp. 574-620.

DU L., WEI C., CAI S., *Economic development and carbon dioxide emissions in China: Provincial panel data analysis*, China Economic Review, Elsevier, Vol. 23, No. 2, 2012, pp. 371-384. DOI: 10.1016/j.chieco.2012.02.004

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA), *Technical Support Document: Technical Update of the Social Cost of Carbon for Regulatory Impact Analysis Under Executive Order 12866*, Interagency Working Group on Social Cost of Greenhouse Gases, United States Government, 2016.

FAO, UNEP, *The State of the World's Forests 2020. Forests, biodiversity and people*, Roma, 2020.

FEDERICI S., VITULLO M., TULIPANO S., DE LAURETIS R., SEUFERT G., *An approach to estimate carbon stocks change in forest carbon pools under the UNFCCC: the Italian case*, iForest – Biogeosciences & Forestry, Vol. 1, No. 2, 2008, pp.86-95. DOI: 10.3832/ifer0457-0010086

GAGLIOPPA P., GUADAGNO R., MARINO D., MARRUCCI A., PALMIERI M., PELLEGRINO D., SCHIRPKE U., CARACAUSI C., *L'asestamento forestale basato su servizi ecosistemici e pagamenti per servizi ecosistemici: considerazioni a valle del progetto LIFE+ Making Good Natura*, Forest@ - Journal of Silviculture and Forest Ecology, Vol. 14, 2017, pp. 99-106.

GASPARINI P., DI COSMO L., POMPEI E., *Il contenuto di carbonio delle foreste italiane. Inventario Nazionale delle Foreste e dei serbatoi forestali di Carbonio INFC2005. Metodi e risultati dell'indagine integrativa*. Ministero delle Politiche Agricole, Alimentari e Forestali, Corpo Forestale dello Stato; Consiglio per la Ricerca e la Sperimentazione in Agricoltura, Unità di ricerca per il Monitoraggio e la Pianificazione Forestale. Trento, 2013.

HAINES-YOUNG R., POTSCHIN M.B., *Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) V5.1 and Guidance on the Application of the Revised Structure*, Fabis Consulting Ltd., Nottingham, 2018. DOI: 10.3897/oneeco.3.e27108

HOPE C., (2008). *Discount rates, equity weights and the social cost of carbon*, Energy Economics 30 (3), 2013, pp. 1011–1019. DOI:10.1016/j.eneco.2006.11.006

INFC, *Guida alla classificazione della vegetazione forestale. Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio*, ISAFA, Trento, 2003.

INGARAMO R., SALIZZONI E., VOGHERA A., *Valuing forest ecosystem services for spatial and landscape planning and design*, Valori e Valutazioni, No. 19, 2017, pp. 65-68.

KALKUHL M., WENZ L., *The impact of climate conditions on economic production. Evidence from a global panel of regions*, Journal of Environmental Economics and Management, Vol. 103, 2020, DOI: 10.1016/j.jeem.2020.102360

KHABAROV N., SMIRNOV A., OBERSTEINER, M., *Social cost of carbon: A revisit from a systems analysis perspective*. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10:923631. DOI: 10.3389/fenvs.2022.923631

LINK P.M., TOL R.S.J., *Possible economic impacts of a shutdown of the thermohaline circulation: an application of FUND*, Portuguese Economic Journal 3(2), 2004, pp. 99-114.

MAGNANI F., RADDI S., *Afforestation and CO<sub>2</sub> fixation: a few reference figures from scientific research*, Forest@ - Journal of Silviculture and Forest Ecology, Vol. 18, 2021, pp. 60-63.

MARKLUND P-O., SAMAKOVLIS E., *What is driving the EU burden-sharing agreement: efficiency or equity?*, Journal

## Servizi ecosistemici forestali: valutazione economica del sequestro di anidride carbonica su area vasta

- of Environmental Management, Vol. 85, No. 2, 2017, pp. 317–329. DOI: 10.1016/j.jenvman.2006.09.017
- MASELLI G., NESTICÒ A., *A probabilistic model for the estimation of Declining Discount Rate [Un modello probabilistico per la stima del saggio di sconto declinante]*, Valori e Valutazioni n. 24, 2020, pp. 181-194, ISSN: 2036-2404. <https://siev.org/14-24-2020/>
- MAVSAR R., VARELA E., PETTENELLA D., VEDEL S.E., JACOBSEN J.B., “The Value of Carbon Sequestration”, in Thorsen B.G., Mavsar R., Tyrvaïnen L., Prokofiev I., Stenger A. (eds.), *The Provision of Forest Ecosystem Services. Volume I: Quantifying and valuing non-marketed ecosystem services*, European Forest Institute, Joensuu, Finland, 2014.
- MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT, *A Report of the Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-Being*, Island Press, Washington DC, 2005.
- MOORE F.C., RISING J., LOLLO N., SPRINGER C., VASQUEZ V., DOLGINOV A., HOPE C., ANTHOFF D., *Mimi-PAGE, an open-source implementation of the PAGE09 integrated assessment model*, Scientific Data, 2018. DOI: 10.1038/sdata.2018.187
- MURADIAN R., CORBERA E., PASCUAL U., KOSOY N., MAY P., *Reconciling theory and practice: an alternative conceptual framework for understanding payments for ecosystem services*, Ecological Economics, Vol. 69, No. 6, 2010, pp. 1202-1208. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2009.11.006
- NESTICÒ A., MASELLI G., *A protocol for the estimate of the social rate of time preference: the case studies of Italy and the USA*. Journal of Economic Studies, Vol. 47, No. 3, 2020, pp. 527-545. <https://doi.org/10.1108/JES-02-2019-0081>
- PEARCE D., *The social cost of carbon and its policy implications*. Oxford Review of Economic Policy, Vol. 19, No. 3, 2003, pp. 362-384. doi:10.1093/oxrep/19.3.362
- PEARCE D., *The Social and Economic Value of Construction: The Construction Industry's Contribution to Sustainable Development*, Open Journal of Business and Management, 2016, Vol. 4, No. 4.
- PENMAN J., GYTARSKY M., HIRAISHI T., KRUGG T., KRUGER D., PIPATTI R., BUENDIA L., MIWA K., NGARA T., TANABE K. AND WAGNER F., *Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry*, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2003.
- PILOGALLO A., SCORZA F., *Regulation and Maintenance Ecosystem Services (ReMES): A Spatial Assessment in the Basilicata Region (Southern Italy)*, Computational Science and Its Applications-ICCSA 2021, Vol. 12955, 2021, pp. 703-716. DOI:10.1007/978-3-030-87007-2\_50
- PINDYCK R.S., *The social cost of carbon revisited*, Journal of Environmental Economics and Management, Vol. 94, 2019, pp. 140-60.
- PRICE R., THORNTON S., NELSON S., *The Social Cost of Carbon and the Shadow Price of Carbon What they are, and how to use them in economic appraisal in the UK*, MPRA Paper 74976, University Library of Munich, Germany, 2007.
- QI S., XU L., COGGINS J., *Deriving Shadow Prices of Environmental Externalities*, University of Minnesota, 2004.
- RENNERT K., ERRICKSON F., PREST B. C., RENNELS L., ET AL. *Comprehensive Evidence Implies a Higher Social Cost of CO<sub>2</sub>*, Nature, 2022. DOI:10.1038/s41586-022-05224-9.
- SALLUSTIO L., QUATRINI V., GENELETTI D., CORONA P., MARCHETTI M., *Assessing land take by urban development and its impact on carbon storage: Findings from two case studies in Italy*, Environmental Impact Assessment Review, Vol. 54, 2015, pp. 80-90. DOI: 10.1016/j.eiar.2015.05.006
- SALNYKOV M., ZELENYUK V., *Estimation of Environmental Efficiencies of Economies and Shadow Prices of Pollutants in Countries in Transition*, EERC Working Paper Series 05-06e, EERC Research Network, Russia and CIS, 2005.
- SOMOGYI Z., CIENCIALA E.E., MAAKIPAA E.R., MUUKKONEN P., LEHTONEN A., WEISS P., *Indirect methods of largescale forest biomass estimation*, European Journal of Forest Research, Vol. 126, 2007, pp. 197-207.
- STERN N., *The Economics of Climate Change: The Stern Review*, Cambridge University Press, Cambridge and New York, 2007.
- STERN N., STIGLITZ, J., *The Social Cost of Carbon, Risk, Distribution, Market Failures: An alternative approach*, NBER Working Paper, No. 28472, 2021.
- TABACCHI G., DI COSMO L., GASPARINI P., *Aboveground tree volume and phytomass prediction equations for forest species in Italy*, European Journal of Forest Research, Vol. 130, No. 6, 2011, pp. 911-934.
- TEEB, *The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Ecological and Economic Foundations*, Earthscan, London, 2010.
- TOL R.S., *A social cost of carbon for (almost) every country*, Energy Economics, Vol. 83, 2019, pp. 555-566. DOI: 10.1016/j.eneco.2019.07.006
- WANG Q., CUI Q., ZHOU D., WANG S., *Marginal abatement costs of carbon dioxide in China: a nonparametric analysis*, Energy Procedia, Vol. 5, 2011, pp. 2316-2320.
- WANG S., CHU C., CHEN G., PENG Z., LI F., *Efficiency and reduction cost of carbon emissions in China: A non-radial directional distance function method*, Journal of Cleaner Production, 113, 2016, pp. 624-634.
- WEI C., LÖSCHEL A., LIU B., *An empirical analysis of the CO<sub>2</sub> shadow price in Chinese thermal power enterprises*, Energy Economics, Vol. 40, 2013, pp. 22-31. DOI: 10.1016/j.eneco.2013.05.018
- WU Q., LIN H., *Estimating Regional Shadow Prices of CO<sub>2</sub> in China: A Directional Environmental Production Frontier Approach*, Sustainability, Vol. 11, 2019, pp. 1-19. DOI: 10.3390/su11020429



WUNDER S., *Payments for environmental services and the Poor: Concepts and preliminary Evidence*, Environment and Development Economics, Vol. 13, No. 3, 2008, pp. 279-297. DOI: 10.1017/S1355770X08004282

ZHANG Y., GU F., LIU S., LIU Y., LI C., *Variation of carbon stocks with forest types in subalpine region of southwestern China*, Forest Ecology Management, Vol. 300, 2013, pp. 88-95.